

30-0101/001



INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG**

Thermische Dehnung und Restfestigkeit von Konstruktionsleichtbeton bei bzw. nach zyklischer Tieftemperaturbean- spruchung

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. U. Pusch

K.-H. Sprenger

November 1984

**Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Forschungsinstituts der Zementindustrie, Düsseldorf**

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BRAUNSCHWEIG

3300 Braunschweig, den 12.12.1984

THERMISCHE DEHNUNG UND RESTFESTIGKEIT VON KONSTRUKTIONSLICHTBETON BEI BZW. NACH ZYKLISCHER TIEFTEMPERATURBEANSPRUCHUNG

F o r s c h u n g s b e r i c h t

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. U. Pusch
K.-H. Sprenger

November 1984

Mit Hilfe von Forschungsmitteln des Forschungsinstituts der Zementindustrie, Düsseldorf in dankenswerter Weise gefördert.

Postsendungen:
3300 Braunschweig, Beethovenstraße 52
Fernschreiber: 9 52 668 ibstb d

Fernsprecher:
331 5421
Ortskennzahl 0531
Kommt keine Verbindung zustande
bitte 331 5431 wählen

Besuchszeiten:
Montag bis Freitag 9 - 16 Uhr

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG

2. ZUSAMMENSETZUNG DER UNTERSUCHTEN KONSTRUKTIONSLEICHTBETONE

3. HERSTELLUNG UND LAGERUNG DER PROBEKÖRPER

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 Thermische Dehnung bei geregelter Abkühlung und Erwärmung

4.2 Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur

4.3 Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

5. VERSUCHSERGEBNISSE

5.1 Thermische Dehnung bei geregelter Abkühlung und Erwärmung

5.1.1 Grundsätzliches Verhalten

5.1.2 Einfluß der Lagerungsart auf das thermische Dehnverhalten

5.1.3 Einfluß der Kernfeuchte der Leichtzuschläge auf das thermische Dehnverhalten

5.1.4 Einfluß des Zementleimgehalts auf das thermische Dehnverhalten

5.2 Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur

5.2.1 Grundsätzliches Verhalten

5.2.2 Einfluß der Lagerungsart auf Festigkeit und Verformung bei tiefen Temperaturen

5.2.3 Einfluß der Kernfeuchte der Leichtzuschläge und des Zementleimgehalts auf Festigkeit und Verformung bei tiefen Temperaturen

5.3 Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

5.3.1 Grundsätzliches Verhalten

5.3.2 Einfluß der Lagerungsart auf Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

5.3.3 Einfluß der Kernfeuchte der Leichtzuschläge und des Zementleimgehalts auf Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

6. ZUSAMMENFASSUNG

7. LITERATUR

1. EINLEITUNG

Der alternative Energieträger Erdgas wird für die Bundesrepublik in der Zukunft zunehmende Bedeutung gewinnen. Um Erdgas wirtschaftlich transportieren und lagern zu können, wird es nach erprobter Technologie verflüssigt. Verflüssigtes Erdgas (LNG) besitzt allerdings unter atmosphärischem Druck die sehr tiefe Temperatur von rd. -165°C . Für den Bau von Flüssiggasbehältern wird sich die Spannbetonbauweise durchsetzen, da sie in Stör- und Katastrophenfällen über eine hohe Rißzähigkeit und über ein überlegenes Sicherheitspotential verfügt. Die Ausführung von Lagerbehältern für das sehr kalte LNG stellt die Bauindustrie jedoch vor schwierige materialtechnische und konstruktive Probleme.

In den letzten Jahren beschränkten sich die Tieftemperaturuntersuchungen auf die Einzelbaustoffe Baustahl, Normalbeton, Bewehrungsstahl und Spannstahl. Die Tieftemperatureigenschaften von Konstruktionsleichtbeton sind dagegen noch wenig erforscht. Die folgenden Erläuterungen zeigen, daß sich gerade Konstruktionsleichtbeton für den Bau von Flüssiggasbehältern besonders gut eignet und auch eine wirtschaftliche Lösung darstellt:

1. Konstruktionsleichtbeton hat eine geringere Rohdichte als Normalbeton. Durch die Anwendung von Konstruktionsleichtbeton sind Gewichtseinsparungen möglich, die sich besonders vorteilhaft auf die Konstruktion von Sicherheitsbehältern in Flüssiggastankern auswirken.

2. Auf Grund der niedrigeren Werte von Wärmeleitfähigkeit und Wärmedehnzahl gegenüber Normalbeton laufen im Leichtbeton die Temperaturreaktionen aus örtlich extremer Temperaturbeanspruchung (z.B. Feuer, Tieftemperaturschock) langsamer ab. Dabei stellen sich geringere Temperaturdehnungen ein, was wiederum zu geringeren Zwängungsspannungen aus den Lastfällen infolge von Temperatur zur Folge hat. Der Konstruktionsleichtbeton stellt damit eine thermisch trägere Masse gegenüber den erwähnten Störfällen dar.

3. Der im Vergleich zu Normalbeton niedrigere Elastizitätsmodul führt zu geringeren Zwängungsspannungen.

Es ist das Ziel der vorliegenden Pilotstudie, einen ersten Einblick in die Tieftemperatureigenschaften des Werkstoffes Konstruktionsleichtbeton zu erhalten.

Die hierzu durchgeführten Untersuchungen lassen sich in 3 Versuchsabschnitte gliedern:

1. Thermische Dehnung bei geregelter Abkühlung und Erwärmung
2. Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur
3. Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

Bei den früheren Tieftemperaturuntersuchungen an Normalbeton hat sich die Betonfeuchte als entscheidender Einflußparameter auf dessen Tieftemperatureigenschaften erwiesen. Zur Klärung der Tieftemperatureigenschaften von Konstruktionsleichtbeton sollen hierauf aufbauend folgende Parameter ins Versuchsprogramm aufgenommen werden:

1. Leichtzuschläge werden entweder haldenfeucht oder ofentrocken angeliefert und können im trockenen oder feuchten Zustand verarbeitet werden. Erfahrungsgemäß hängen jedoch die Frischbetoneigenschaften von der Ausgangsfeuchte der Leichtzuschläge ab, selbst, wenn bei der Wasserzugabe der Wassergehalt des Leichtzuschlags den Richtlinien entsprechend berücksichtigt wird. Bei der Herstellung der Versuchsbetone sollen demnach einerseits ofentrockene, andererseits vorgefeuchtete Leichtzuschläge zur Anwendung kommen.

2. Die Verarbeitbarkeit des Leichtbetons soll zum einen durch einen hohen Zementleimgehalt und zum anderen durch einen niedrigeren Zementleimgehalt bei gleichzeitiger Verwendung eines Fließmittels eingestellt werden. Der wirksame Wasserzementwert soll dabei für beide Versuchsbetone identisch sein.

3. Die Probekörper werden drei verschiedenen Lagerungsbedingungen unterworfen. Die Normallagerung N (+20 °C, 65 % r. F.) soll näherungsweise die Feuchtigkeitsverhältnisse widerspiegeln, die im äußersten Randbereich an der trocknenden Seite von Spannbetonbehälterwänden mit einseitiger Dichthaut vorherrschen. Die Lagerung F "Versiegelung in Folie" soll die Feuchtigkeitsverhältnisse unmittelbar hinter der Dichthaut simulieren. Alternativ werden Betonkörper hergestellt, die, ohne ausgeschalt zu werden, bis zur Versuchsdurchführung bei +20 °C und 65 % r. F. lagern. In diesem Zeitraum soll eine Trocknung nur über eine freie Oberfläche möglich sein. Dieser einseitige Trocknungsprozeß findet sowohl in Spannbetoninnen- als auch -außenwänden mit einseitigem Liner statt. Die Versuchsdurchführung sollte im Alter von rd. 150 d stattfinden.

2. ZUSAMMENSETZUNG DER UNTERSUCHTEN KONSTRUKTIONSLICHTBETONE

Die angestrebte Betongüte des Konstruktionsleichtbetons ist LB45, die auch für den Bau von LNG-Behältern gewählt werden würde. Der Leichtbeton wird aus PZ45 F, hochfestem Liapor-Leichtzuschlag mit Größtkorn 16 mm und Natursand 0/2 mm zusammengesetzt.

Aus den im Abschnitt 1 genannten Parametern ergeben sich vier unterschiedliche Leichtbetonmischungen (Tab. 1).

Die Mischungen sowie wesentliche Leichtbetonkennwerte sind den Tabellen 2 und 3 zu entnehmen.

Tabelle 1: Bezeichnung der Leichtbetonmischungen

Leichtbeton- mischung	wesentliche Merkmale
A	hoher Zementleimgehalt; ofentrockene Leichtzu- schläge
B	niedrigerer Zementleimgehalt, Fließmittel; ofen- trockene Leichtzuschläge
C	hoher Zementleimgehalt; vorgefeuchtete Leichtzu- schläge
D	niedrigerer Zementleimgehalt, Fließmittel; vorge- feuchtete Leichtzuschläge

Tabelle 2: Zusammensetzung und Eigenschaften der Konstruktionsleichtbetone A und B (ofentrockene Zuschläge)

Eigenschaften	Einheit	Leichtbeton A	Leichtbeton B
Festigkeitsklasse	-	LB45	LB45
Konsistenzbereich	-	K2/3	K2/3
Verdichtungsmaß v	-	1,10	1,11
wirks. Wasserzementwert W/Z	-	0,45	0,45
Gesamtwassergehalt W_{ges}	kg/m ³	257	224
W_{30}	kg/m ³	39	42
wirks. Wassergehalt $W_{wirks.}$	kg/m ³	218	182
Zementgehalt Z	kg/m ³	434	363
EFA-Füller	kg/m ³	80	83
Fließmittel	kg/m ³	-	3,1
Zuschläge:			
Natursand 0/2 mm	kg/m ³	307	338
Liaporsand 0/4 mm	kg/m ³	178	196
Liaporkorn 4/8 mm	kg/m ³	223	244
Liaporkorn 8/16 mm	kg/m ³	222	243
Summe	kg/m ³	930	1021
Frischbetonrohddichte	kg/dm ³	1,78	1,77
Betonrohddichte nach 28 Tg.	kg/dm ³	1,75	1,72
Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tg.	N/mm ²	60	56
bei VD (nach ca. 150 Tg.)	N/mm ²	59	61

Tabelle 3: Zusammensetzung und Eigenschaften der Konstruktionsleichtbetone C und D (vorgefeuchtete Zuschläge)

Eigenschaften	Einheit	Leichtbeton C	Leichtbeton D
Festigkeitsklasse	-	LB45	LB45
Konsistenzbereich	-	K2/3	K2/3
Verdichtungsmaß v	-	1,13	1,10
wirks. Wasserzementwert W/Z	-	0,45	0,45
Gesamtwassergehalt W_{ges}	kg/m ³	300	287
Wassergehalt der vorgefeuchteten Leichtzuschläge	kg/m ³	80	105
wirks. Wassergehalt $W_{wirks.}$	kg/m ³	220	182
Zementgehalt Z	kg/m ³	450	350
EFA-Füller	kg/m ³	80	80
Fließmittel	kg/m ³	-	4,7
Zuschläge:			
Natursand 0/2 mm	kg/m ³	304	341
Liaporsand 0/4 mm	kg/m ³	177	198
Liaporkorn 4/8 mm	kg/m ³	221	247
Liaporkorn 8/16 mm	kg/m ³	219	245
Summe	kg/m ³	921	1031
Frischbetonrohddichte	kg/dm ³	1,84	1,79
Betonrohddichte nach 28 Tg.	kg/dm ³	1,79	1,74
Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tg	N/mm ²	56	50
bei VD (nach ca. 150 Tg.)	N/mm ²	61	58

3. HERSTELLUNG UND LAGERUNG DER PROBEKÖRPER

Auch beim Konstruktionsleichtbeton dürfte ein zylindrischer Probekörper mit 8 cm Durchmesser geeignet sein, ein möglichst homogenes Temperaturfeld innerhalb des Probekörpers zu gewährleisten.

Wesentlich bei der Herstellung war, daß sämtliche Probekörper einer Leichtbetonzusammensetzung (A, B, C, D) auch nur aus einer Mischerfüllung stammen. Das ermöglicht die Herstellung von Probekörpern weitgehend einheitlicher Güte aus jeweils einer Zusammensetzung. Die umfangreichen Untersuchungen machten die Herstellung einer Vielzahl von Probekörpern (ca. 350 Stck.) erforderlich. Leider konnte hierzu eine ausreichende Menge an Stahlschalungen mit 8 cm Durchmesser nicht bereitgestellt werden.

Aus diesem Grund wurde folgender Weg gegangen:

Aus jeder der vier Leichtbetonmischungen wurde ein Betonkörper mit den Abmessungen 80/80/32 cm³ hergestellt. Nach dem Ausschalen lagerten die Betonkörper 7 Tage unter feuchten Tüchern. Anschließend wurden aus jedem Betonkörper rd. 70 Bohrkern mit $\varnothing = 8$ cm, $h = 32$ cm durch nasses Bohren entnommen. Die Kerne wurden dann durch trockenes Sägen und planparalleles Schleifen in Abschnitte mit $\varnothing = 8$ cm, $h = 8$ cm und $\varnothing = 8$ cm, $h = 16$ cm unterteilt (siehe Bild 1).

Frühere Untersuchungen an Normalbeton hatten gezeigt, daß insbesondere der Feuchtegehalt des Betons einen wesentlichen Einfluß auf die Tieftemperatureigenschaften ausübt. Aus diesem Grund waren zusätzliche Überlegungen zur Art der Bohrkernentnahme anzustellen. Die "trockene" Bohrkernentnahme ist aufwendig und kann darüber hinaus eine unerwünschte Austrocknung der Probenoberfläche bewirken. Bei der "nassen" Bohrkernentnahme dagegen ist mit einer zusätzlichen Feuchtigkeitsaufnahme insbesondere über die "angeschnittenen" größeren Leichtzuschlagkörner zu rechnen. Zur Klärung dieser Frage wurde die Wassereindringtiefe an der Kern-

oberfläche von "naß" und "trocken" gezogenen Bohrkernen vergleichend bestimmt. Hierzu wurden die Körper, nach 30 minütiger Lagerung in uraninhaltigem Wasser, längs gespalten und unter UV-Licht betrachtet. Beide Proben zeigten Wassereindringtiefen von rd. 2 mm. Die Maximalwerte betrugen rd. 5 mm im Bereich von Leichtzuschlägen größeren Durchmessers. Es kann demnach davon ausgegangen werden, daß die Art der Bohrkernentnahme - naß oder trocken - einen vernachlässigbaren Einfluß auf den Feuchtegehalt der Proben ausüben wird. Die Kernentnahme konnte somit "naß" erfolgen.

Für die dem Betonkörper 80/80/32 cm³ entnommenen Proben waren zwei verschiedene Lagerungsarten vorgesehen:

1. Lagerung bei +20 °C und 65 % r.F., im folgenden auch Normal-lagerung (N) genannt;
2. Versiegelung der Proben mit Folie (F); hierdurch wird erreicht, daß sich der Ausgangswassergehalt der Probekörper während der Lagerung nicht verändert.

Neben diesen beiden Lagerungsarten wurde, wie schon erwähnt, vergleichend eine 3. Variante mit aufgenommen. Diese soll die Austrocknungsbedingungen simulieren, die in dickwandigen, einseitig trocknenden Bauteilen (z.B. Spannbeton-LNG-Behälterwand mit Liner) vorliegen. Hierzu wurde je Leichtbetonmischung (A, B, C, D) eine Kunststoffwanne (55/36⁵/32 cm³) mit Beton gefüllt. Diese Betonkörper (K) lagerten dann, ohne ausgeschalt zu werden, bis zur Versuchsdurchführung im Klima 20 °C/65 % r.F. Während dieser Zeit konnten die Betonkörper nur über die Oberfläche 55 x 36,5 cm² austrocknen. Unmittelbar vor Versuchsdurchführung wurden, wie schon beschrieben, Bohrkern (18 Kerne je Betonkörper) entnommen und diese in Abschnitte 8/8cm bzw. 8/16 cm unterteilt. Durch anschließende Versiegelung mit Folie wurde der Feuchtegehalt bis zur Prüfung konstant gehalten.

Zur Bestimmung des Feuchtegehalts wurden die Leichtbetonproben zum Zeitpunkt der Prüfung bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet. Die mittlere Betonfeuchte wurde mit der Beziehung

$$u_m = \frac{G(t) - G_{tr}}{G_{tr}} \cdot 100 \text{ [M-\%]}$$

ermittelt.

Um die Feuchtigkeitsverteilung über die Höhe der Proben der oben offenen Körper K bestimmen zu können, wurden zwei 32 cm hohe Bohrkerne je Körper in 5 Abschnitte mit ca. 6,5 cm Höhe gespalten. Diese wurden dann wieder bei 105 °C getrocknet.

Das Ergebnis der Trocknungsversuche mit den im folgenden verwendeten Probenbezeichnungen ist Tabelle 4 zu entnehmen. Bild 2 zeigt, daß die relative Betonfeuchte über die Höhe der Probekörper K mit Ausnahme der oberflächennahen Randstücke praktisch konstant ist und in etwa der Feuchte der versiegelten Proben (F) entspricht. Bei der Teilung der Probekerne K in die Prüflingsabschnitte wurde das oberflächennahe Randstück verworfen (Bild 3).

Tabelle 4: Zusammenstellung der mittleren Betonfeuchten der untersuchten Leichtbetonproben

Bezeichnung der Proben und Eigenschaften	mittlere Betonfeuchte u_m [M-%]
LB-Probe AN: - hoher Zementleimgehalt - Leichtzuschläge ofentrocken - Lagerung: 20 °C/65 % r.F.	7,8
LB-Probe AF: - Lagerung: in Folie - sonst wie AN	11,6
LB-Probe AK: - Lagerung: einseitige Trocknung - sonst wie AN	11,3
LB-Probe BN: - Fließmittel - Leichtzuschläge ofentrocken - Lagerung: 20 °C/65 % r.F.	7,2
LB-Probe BF: - Lagerung: in Folie - sonst wie BN	11,1
LB-Probe BK: - Lagerung: einseitige Trocknung - sonst wie BN	10,9
LB-Probe CN: - hoher Zementleimgehalt - Leichtzuschläge vorgefeuchtet - Lagerung: 20 °C/65 % r.F.	8,7
LB-Probe CF: - Lagerung: in Folie - sonst wie CN	13,8
LB-Probe CK: - Lagerung: einseitige Trocknung - sonst wie CN	14,0
LB-Probe DN: - Fließmittel - Leichtzuschläge vorgefeuchtet - Lagerung: 20 °C/65 % r.F.	7,3
LB-Probe DF: - Lagerung: in Folie - sonst wie DN	13,4
LB-Probe DK: - Lagerung: einseitige Trocknung - sonst wie DN	14,4

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 Thermische Dehnung bei geregelter Abkühlung und Erwärmung

Die Messung der thermischen Dehnung erfolgte mittels Tiefkühlkammer, Dilatometer und induktivem Wegaufnehmer. Die Tieftemperaturen wurden durch dosierte Injektionen mit verflüssigtem Stickstoff erzeugt. Die Anordnung von 4 Dilatometern in einer Kältekammer, gemäß Bild 4, erlaubte die gleichzeitige Messung der thermischen Dehnung von 4 Probekörpern. Weitere Angaben zur Meßapparatur sind der Arbeit von Wiedemann /1/ zu entnehmen.

Das thermische Dehnverhalten wurde an Zylinderproben mit $\varnothing = 8 \text{ cm}$, $h = 16 \text{ cm}$ zwischen $+20^\circ\text{C}$ und -170°C gemessen. Die Leichtbetonproben K wurden einem Tieftemperaturzyklus, die normal- (N) und foliengelagerten (F) Proben 10 Tieftemperaturzyklen unterworfen.

Wesentlich bei der Wahl der Abkühlgeschwindigkeit ist es, die Temperaturdifferenz zwischen Probenoberfläche und -zentrum und damit auch die Eigenspannungen in Grenzen zu halten. Im Vorversuch wurden mittels Fe-Konstantan-Thermoelemente die Temperaturen in der Achse des Betonzylinders, an seiner Oberfläche und in der Kammer gemessen. Diese Untersuchungen wurden mit Abkühlgeschwindigkeiten von 1° K/min. und $0,5^\circ \text{ K/min.}$ an einer Leichtbetonprobe BN durchgeführt. Diese ließ wegen ihrer niedrigen Feuchte die kleinste Wärmeleitzahl und damit die größte Temperaturdifferenz zwischen Probenoberfläche und -zentrum erwarten. Das Bild 5 zeigt, daß die Temperaturdifferenz während eines Temperaturzyklus ($+20^\circ\text{C}$ bis -170°C bis $+20^\circ\text{C}$) bei einer Temperaturänderungsgeschwindigkeit von 1° K/min immer kleiner als ca. 25°C ist. Bei einer Abkühlungsgeschwindigkeit von $0,5^\circ \text{ K}$ beträgt die maximale Temperaturdifferenz nur noch ca. 15°C . In beiden Fällen sind die thermischen Spannungen relativ klein. Im Rahmen dieser Pilotstudie schien es deshalb sinnvoll, die Temperaturänderungsgeschwindigkeit auf 1° K/min festzusetzen, zumal die zyklische Temperaturbeanspruchung (bis $n = 10$ Zyklen) ohnehin einen hohen Zeitaufwand und

damit auch großen Flüssigstickstoffverbrauch erfordert. An den Temperaturwendepunkten (-170°C , $+20^{\circ}\text{C}$) wurde die Kammertemperatur solange konstant gehalten, bis die Betontemperatur über den gesamten Probenquerschnitt homogen verteilt war. Die erforderliche Haltezeit betrug hierzu ca. 45 Minuten.

Um die Feuchtigkeit während des Versuchs konstant zu halten, wurden die Proben K in eine Alu-Folie diffusionsdicht verpackt. Auch die Proben N und F, deren Temperaturdehnungen während 10 Zyklen gemessen werden sollten, wurden zunächst mit Alu-Folie versiegelt. Nach ca. 5 bis 6 Zyklen wurde die Alu-Folie aber spröde und riß auf. Die Proben nahmen schließlich so viel Feuchtigkeit aus Kondenswasserbildung auf, daß dieser Versuch abgebrochen werden mußte. Im zweiten Versuch wurde die Alu-Folie durch eine 0,10 mm Kupferfolie ersetzt, die an den Nahtstellen durch Löten verbunden und abgedichtet wurde. Gewichtsmessungen ergaben, daß sich der Feuchtehaushalt der Prüflinge auch nach 10 Tieftemperaturzyklen nicht geändert hatte.

4.2 Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur

Zur Prüfung der Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit sowie zur Aufnahme von Spannungs-Dehnungs-Linien wurde eine mit Flüssigstickstoff betriebene Kältekammer in eine Druckprüfmaschine eingebaut. Die Lasten wurden von den Häuption aus über Stahl-druckstempel, die durch Kammerdecke und -boden geführt wurden, auf die Probe in der Kältekammer aufgebracht (s. hierzu /1/ und Bild 6).

Die Proben für die Druckprüfungen hatten die Abmessungen $\varnothing = 8 \text{ cm}$ und $h = 16 \text{ cm}$, die für die Spaltzugprüfungen $\varnothing = 8 \text{ cm}$ und $h = 8 \text{ cm}$. Zur Messung der lastabhängigen Dehnungen wurden auf den Probekörper ($h = 16 \text{ cm}$) in halber Höhe 2 elektrische Dehnmeßstreifen im Winkel von 180° geklebt. Die Belastung erfolgte kolbenweggeregelt.

Der Ermittlung der Druckfestigkeiten lagen jeweils 2 Probekörper zugrunde, der Ermittlung der Spaltzugfestigkeiten jeweils 3 Probekörper. Die Aufnahme der σ - ϵ -Linie wurde an einem Probekörper vorgenommen. Prüftemperaturen waren bei den normalgelagerten (N) und den versiegelten (F) Proben $\vartheta = +20^{\circ}, -40^{\circ}, -80^{\circ}, -135^{\circ}, -170^{\circ}\text{C}$; bei den Proben K $\vartheta = +20^{\circ}, -100^{\circ}, -170^{\circ}\text{C}$.

4.3 Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

Vorgesehen waren hier die folgenden Prüfungen: Ermittlung der Zylinderdruckfestigkeit, Zylinderspaltfestigkeit und der Spannungs-Dehnungs-Linie bei Raumtemperatur vor und im Anschluß an Tieftemperaturzyklen.

Der Verlauf der thermischen Dehnungen gemäß der Bilder 7 bis 15 zeigt, daß der Gefrierprozeß beim Abkühlen der Proben bei ca. -70°C abgeschlossen ist. Unterhalb dieser Temperatur kommt es zu keinen weiteren Expansionen. Hierauf wird später noch eingegangen. Es schien demnach gerechtfertigt, Ober- und Untertemperatur der Zyklen auf $+20^{\circ}\text{C}$ bzw. -85°C festzulegen. Die zyklische Temperaturbeanspruchung der Proben erfolgte in einem elektrisch betriebenen Kühlschrank, der auch die genaue Einstellung der Abkühlgeschwindigkeit von 1°K/min und die erforderlichen Haltezeiten von ca. 45 Minuten ermöglichte. Anschließend wurden die Proben bei Raumtemperatur in einer Druckprüfmaschine auf ihre o.g. Eigenschaften hin untersucht.

Druck- und Spaltzugfestigkeiten der normalgelagerten und versiegelten Proben wurden nach $n = 0, 1, 3, 10$ Temperaturzyklen, die der Proben K nach $n = 0, 3, 10$ Temperaturzyklen an jeweils 3 Probekörpern bestimmt. Die σ - ϵ -Linien wurden nach $n = 0, 10$ Zyklen nur für Proben K aufgezeichnet.

5. VERSUCHSERGEBNISSE

5.1 Thermische Dehnung bei geregelter Abkühlung und Erwärmung

5.1.1 Grundsätzliches Verhalten

Die Bilder 7 bis 12 zeigen die thermische Dehnung von normalgelagerten und versiegelten Leichtbetonproben während 10 Tieftemperaturzyklen, die Bilder 14 und 15 die thermische Dehnung der Proben K während eines Tieftemperaturzyklus.

Betrachtet man den Verlauf der thermischen Dehnung während eines Zyklus, so ist ein Temperaturdehnverhalten erkennbar, das dem eines versiegelten bzw. wassersatten Normalbetons sehr ähnlich ist: Nach einer anfänglichen Kontraktion im Bereich $+20$ bis -20 °C dehnt sich der Leichtbeton zwischen -20 und ca. -65 °C aus. Beim Normalbeton ist diese Expansion u.a. auf die Volumenvergrößerung des Porenwassers in der Zementsteinmatrix beim Gefrieren zurückzuführen. Beim Leichtbeton gefriert zusätzlich das Porenwasser in den Leichtzuschlägen. Wie weit sich evtl. in den Leichtzuschlägen einstellende Expansionen an der Gesamtexpansion der Leichtbetonprobe beteiligen, müßte durch Tieftemperaturversuche am Einzelbaustoff "Leichtzuschlagkorn" geklärt werden.

Bei weiterer Abkühlung bis auf -170 °C kommt es dann zu einer nahezu linearen Kontraktion. Der gesamte Temperaturbereich wird bei Erwärmung rücklaufend durchfahren, wobei aber die maximale thermische Dehnung, die sich beim Abkühlvorgang nach der Expansion eingestellt hat, noch übertroffen wird. Abweichend hiervon lag bei der Probe CF beim 9. und 10. Zyklus das Maximum der Erwärmungsphase unterhalb dem der Abkühlungsphase (Bild 11). Zur Deutung dieser Erscheinung sind aber weitere Versuche zur thermischen Dehnung bei zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung erforderlich.

Nach vollständiger Erwärmung auf $+20$ °C verbleibt bei den Leichtbetonproben mit höherer Feuchtigkeit eine irreversible Gefügauf-

weitung, während die trockeneren Proben wieder ihre Ausgangslänge einnehmen.

Betrachtet man die Abkühl- und Erwärmungsvorgänge über mehrere Zyklen, so erscheint wesentlich, daß die irreversible Gefügebrauchung mit jedem Zyklus anwächst.

5.1.2 Einfluß der Lagerungsart auf das thermische Dehnverhalten

Die Bilder 7 bis 15 veranschaulichen, daß sich die Lagerungsart und damit auch der Feuchtigkeitsgehalt des Leichtbetons (s. Tabelle 4) entscheidend auf das Tieftemperaturverhalten auswirken. In der Tabelle 5 sind die charakteristischen thermischen Dehnungswerte wie "Expansion" und "irreversible Restdehnung" zusammengestellt. Es wird deutlich, daß diese umso größer ausfallen, je feuchter die Leichtbetonprobe ist. In Bild 13 ist die Abhängigkeit der irreversiblen Restdehnung der normalgelagerten und versiegelten Proben von der Anzahl der Temperaturzyklen aufgetragen.

Der Verlauf der Temperaturdehnungen der Proben K, der nur bei einem Temperaturzyklus gemessen wurde, entspricht weitgehend dem der versiegelten Proben; ein Ergebnis, das aufgrund etwa gleich großer Feuchtigkeitsgehalte der Proben K und F auch zu erwarten ist.

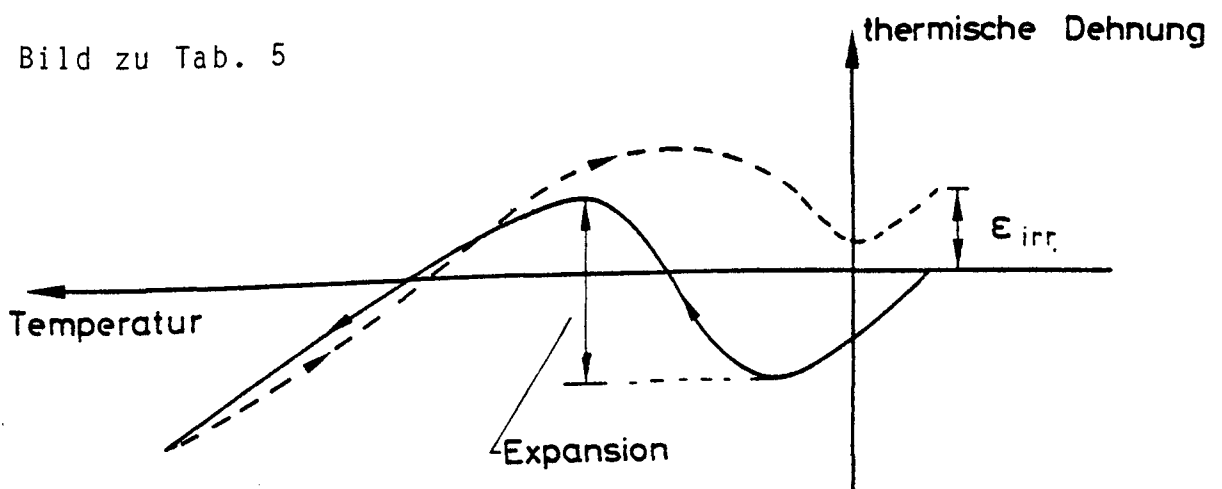
5.1.3 Einfluß der Kernfeuchte der Leichtzuschläge auf das thermische Dehnverhalten

Bei der Herstellung der Leichtbetone A und B stellt sich durch Wassersaugen der anfangs ofentrockenen Leichtzuschläge die Kernfeuchte ein. Diese Kernfeuchte dürfte aber erheblich unter jener liegen, die sich nach mehrtägiger reichlicher Vorfeuchtung der Leichtzuschläge für die Leichtbetone C und D eingestellt hatte (s. Tab. 1, 2 und 3).

Tabelle 5: Zusammenstellung der charakteristischen thermischen Dehnungswerte

Probe	Feuchtegehalt u_m [%]	Expansion beim 1. Temp.-Zykl. [‰]	irrev. Restdehnung ϵ_{irr} nach einem Temp.-Zykl. [‰]	irrev. Restdehnung ϵ_{irr} nach 10 Temp.-Zykl. [‰]
AN	7,8	0,09	0	0
AF	11,6	0,79	0,26	2,09
AK	11,3	0,51	0,14	-
BN	7,2	0,05	0	0
BF	11,1	1,30	0,53	4,02
BK	10,9	0,74	0,28	-
CN	8,7	0,39	0,15	1,38
CF	13,8	1,63	0,79	6,09
CK	14,0	1,28	0,56	-
DN	7,3	0,07	0,11	0,26
DF	13,4	1,07	0,56	3,67
DK	14,4	0,93	0,47	-

Bild zu Tab. 5



Zur Klärung des Einflusses der Kernfeuchte ist das thermische Dehnverhalten der Proben A mit dem der Proben C bzw. der Proben B mit dem der Proben D zu vergleichen. Die Expansionen und thermischen Restdehnungen sind bei den Proben mit vorgefeuchteten Leichtzuschlägen größer als bei den Proben mit anfangs ofentrockenen Leichtzuschlägen. Es kann demnach vermutet werden, daß in Leichtbeton mit Leichtzuschlägen höherer Kernfeuchte beim Gefrierprozeß größere Gefügezerstörungen auftreten als in Leichtbeton mit trockeneren. Zur Erhärtung dieser Vermutung sind aber noch weitere Versuche erforderlich. Vor allem müßte auch die Frage geklärt werden, wie hoch die Kernfeuchte in den Leichtzuschlägen im erhärteten Leichtbeton zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung ist.

5.1.4 Einfluß des Zementleimgehalts auf das thermische Dehnverhalten

Die Leichtbetone A und C wurden mit einer erhöhten Zementleimmenge angemacht. Bei der Herstellung der Leichtbetone B und D wurde die gleiche Konsistenz bei einer geringen Zementleimmenge mit einem Fließmittel eingestellt. Ein nennenswerter Einfluß der Zementleimmenge auf das thermische Dehnverhalten ist aber nicht erkennbar.

5.2 Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur

5.2.1 Grundsätzliches Verhalten

Die Bilder 16 bis 23 zeigen, daß Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von Konstruktionsleichtbeton mit sinkender Prüftemperatur ansteigen. Die Zylinderdruckfestigkeit steigt im Tieftemperaturbereich +20 bis -135 °C etwa linear an. Unterhalb -135 °C ist der Festigkeitsanstieg geringer; z.T. nimmt die Druckfestigkeit wieder ab (Bild 16). Die maximale Druckfestigkeitssteigerung beträgt ca. 160 bis 190 % (Bilder 17, 21). Bei der Spaltzugfestigkeit fällt auf, daß der Festigkeitsanstieg bei -40 °C weitgehend abgeschlossen ist (Bild 18). Unterhalb -40 °C bleibt die Spaltzugfestigkeit nahezu konstant. Bei einigen Proben

ist auch hier zwischen -135 und -170 °C ein Festigkeitsabfall zu beobachten. Die Steigerung der Spaltzugfestigkeit streut zwischen ca. 125 und 160 % (Bild 19). Frühere Untersuchungen mit Normalbeton haben hier je nach Lagerungsart Druckfestigkeitssteigerungen von ca. 300 % und Spaltzugfestigkeitssteigerungen von ca. 250 % ergeben. Der deutlich geringere Festigkeitsanstieg beim Leichtbeton ist darauf zurückzuführen, daß in erster Linie die gegenüber der Zementsteinfestigkeit niedrige Korneigenfestigkeit die Leichtbetonfestigkeit bestimmt.

In den Bildern 24 bis 28 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien in Abhängigkeit von der Tieftemperatur aufgetragen. Es wird deutlich, daß Druckfestigkeit und E-Modul mit fallender Temperatur zunehmen. Der Konstruktionsleichtbeton zeigt über den gesamten Temperaturbereich ein nahezu ausgeprägtes linear-elastisches und sprödes Verformungsverhalten. In der Tabelle 6 sind die E-Moduli der normalgelagerten und versiegelten Leichtbetonproben zusammengestellt, in der Tabelle 7 die der Proben mit einseitiger Trocknung. Dabei wurde der Elastizitätsmodul als der Sekantenmodul zwischen dem Ursprung und etwa einem Drittel der Druckfestigkeit definiert. Bezieht man die einzelnen bei Tieftemperatur ermittelten E-Moduli auf den E-Modul bei Raumtemperatur (Bild 29), so erkennt man, daß der E-Modul bei Abkühlung von $+20$ auf -40 °C konstant bleibt, z.T. sogar abnimmt. Bei weiterer Abkühlung wächst der E-Modul linear bis zu einem Maximum von ca. 150 bis 190 % bei -170 °C.

Tabelle 6: Elastizitätsmodul $[N/mm^2]$ von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 bei tiefen Temperaturen

T °C	Proben							
	AN	BN	AF	BF	CN	DN	CF	DF
+20	17990	17978	21266	19138	13371	15075	20503	20780
-40	17389	15329	20406	19426	15487	15259	21034	19702
-80	20550	19171	24626	23223	25895	16094	24216	22164
-135	26012	28051	31560	30449	33415	22673	33065	29946
-170	28608	29695	36550	35339	40474	31975	38458	35530

Tabelle 7: Elastizitätsmodul $[N/mm^2]$ von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" bei tiefen Temperaturen

T °C	Proben			
	AK	BK	CK	DK
+20	20398	20823	21266	20398
-100	27438	27685	23281	24783
-170	29982	31817	24360	34645

Die untersuchten Leichtbetonproben weisen bei Raumtemperatur eine Bruchdehnung von ca. 3,2‰, im Temperaturbereich -40 bis -80 °C eine maximale Bruchdehnung von ca. 4‰ auf. Bei -170 °C fällt die Bruchdehnung auf ca. 80 bis 100 % der bei +20 °C gemessenen Bruchdehnung ab (Bild 31).

5.2.2 Einfluß der Lagerungsart auf Festigkeit und Verformung bei tiefen Temperaturen

Der Einfluß der Lagerungsart auf die Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit bei tiefen Temperaturen ist den Bildern 16 und 18 zu entnehmen. Die versiegelten Leichtbetonproben mit höherem Feuchtigkeitsgehalt weisen gegenüber den normalgelagerten Proben die größeren Tieftemperaturfestigkeiten auf. Dies ist für die Spaltzugfestigkeit ausgeprägter als für die Druckfestigkeit. Zwischen der Lagerungsart und den auf +20 °C bezogenen Tieftemperaturfestigkeiten (Bilder 17, 19) ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen. Auffallend sind die gegenüber den übrigen Proben wesentlich größeren bezogenen Druckfestigkeiten der relativ feuchten Probe CF (Bild 17). Bei dieser Probe wurden relativ kleine Druckfestigkeiten bei +20 °C gemessen, während sich im Vergleich zu den anderen Proben relativ große Tieftemperatur-Druckfestigkeiten herausgestellt haben. Hier sind noch weitere Untersuchungen durchzuführen.

Der Elastizitätsmodul bei den einzelnen Prüftemperaturen ist um so größer, je höher der Feuchtigkeitsgehalt ist (Bilder 24 bis 28, Tab. 6 und 7). Die Elastizitätsmoduli der Proben K liegen aufgrund des vorhandenen Feuchtegehalts erwartungsgemäß zwischen den Werten der normalgelagerten und versiegelten Prüflinge. Die auf +20 °C bezogenen E-Moduli (Bild 29) liegen, mit Ausnahme der E-Moduli der Probe CN, bei der ein relativ niedriger E-Modul bei Raumtemperatur ermittelt wurde, dicht beieinander, so daß hier eine Abhängigkeit nicht festgestellt werden kann.

Die Ergebnisse der Bruchdehnungsmessungen streuen in einem weiten Bereich. Bei der beschränkten Probenanzahl kann demnach keine Aussage zur Abhängigkeit der Bruchdehnungen von Konstruktionsleichtbeton von der Lagerungsart getroffen werden.

5.2.3 Einfluß der Kernfeuchte der Leichtzuschläge und des Zementleimgehalts auf Festigkeit und Verformung bei tiefen Temperaturen

Auf einen nennenswerten Einfluß dieser Parameter auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei tiefen Temperaturen weisen die vorliegenden Ergebnisse nicht hin.

5.3 Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

5.3.1 Grundsätzliches Verhalten

Bei Betrachtung der mechanischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur im Anschluß an Tieftemperaturzyklen können erhebliche Einbußen festgestellt werden (Bilder 32 bis 34). Bei der Spaltzugfestigkeit sind größere Einbußen zu erwarten als bei der Druckfestigkeit. Mit jedem Tieftemperaturzyklus nimmt die Schädigung des Leichtbetongefüges zu. Diese Feststellung steht auch im Einklang mit dem beobachteten thermischen Dehnverhalten.

Die Spannungs-Dehnungs-Linien wurden vergleichsweise nach 0 und 10 Zyklen nur für die Probekörper K aufgetragen (Bild 35). Auffällig ist hier, daß z.T. die Anfangskrümmungen der σ - ϵ -Linie nach 10 Zyklen ihre Vorzeichen geändert haben und die Bruchdehnungen nach Tieftemperaturzyklen erheblich zunehmen. Die höhere Bruchdehnung erklärt sich hier aus der Zusammendrückung der infolge Temperaturzyklen expandierten Leichtbetonproben beim anschließenden Druckversuch.

5.3.2 Einfluß der Lagerungsart auf Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

Die Festigkeitsverluste nach Tieftemperaturzyklen sind bei den feuchteren, versiegelten Leichtbetonproben und den Proben K wesentlich höher als bei den normalgelagerten (Bilder 32 bis 34). Auch bei dieser Versuchsreihe muß aufgrund einer sehr kleinen Anzahl Prüflinge mit größeren Ergebnisstreuungen gerechnet werden. Es wird aber deutlich, daß die Restfestigkeiten nach 10 Zyklen bei den normalgelagerten Proben zwischen 80 und 100 % liegen werden. Bei den Proben mit höherer Feuchtigkeit können dagegen die Restdruckfestigkeiten auf ca. 50 %, die Restspaltzugfestigkeit auf ca. 30 % und die Restelastizitätsmoduli sogar auf ca. 20 % zurückfallen.

Die im Bild 35 aufgetragenen Spannungs-Dehnungs-Linien veranschaulichen, daß die Bruchdehnungen um so größer sind, je höher die Feuchtigkeit des Leichtbetons ist. Die Steigerung der Bruchdehnung nach 10 Tieftemperaturzyklen - bezogen auf die Bruchdehnung nach $n = 0$ Zyklen - beträgt maximal ca. 210 %.

5.3.3 Einfluß der Kernfeuchte der Leichtzuschläge und des Zementleimgehalts auf Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

Die Ergebnisse lassen vermuten, daß Leichtzuschläge mit einer größeren Kernfeuchte ein höheres Maß an Festigkeitsverlusten nach Tieftemperaturzyklen bewirken als trockenere Leichtzuschläge. Ein Einfluß der Zementleimmenge auf die Restfestigkeiten im Anschluß an Tieftemperaturzyklen kann nicht eindeutig nachgewiesen werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Materialeigenschaften von Normalbeton bei sehr tiefen Temperaturen sind in den letzten Jahren weitgehend erforscht worden. Er hat sich dabei als ein für den Bau von LNG-Behältern geeigneter Werkstoff erwiesen.

Es ist zu erwarten, daß sich auch Konstruktionsleichtbeton wegen einer Reihe günstiger physikalischer Eigenschaften für den LNG-Behälter-Bau als geeignet erweist. Die Tieftemperatureigenschaften von Konstruktionsleichtbeton sind aber noch wenig erforscht.

Die vorliegende Pilotstudie soll hier einen ersten Einblick in das Verhalten von Konstruktionsleichtbeton bei tiefen Temperaturen verschaffen.

Dabei wurden folgende Parameter untersucht:

Beanspruchungsparameter

- Prüftemperatur
- Zahl der Tieftemperaturzyklen

Werkstoffparameter

- Zementleimmenge
- Kernfeuchte der Leichtzuschläge

Lagerungsparameter

- Feuchtegehalt als Funktion der Vorlagerungsart

Im folgenden werden die wesentlichen Versuchsergebnisse zusammengefaßt:

Thermisches Dehnverhalten bei tiefen Temperaturen

1. Der entscheidende Einflußparameter ist der Feuchtigkeitsgehalt des Konstruktionsleichtbetons zum Zeitpunkt der Tieftemperatureinwirkung.
2. Feuchter foliengelagerter Leichtbeton erfährt bei Abkühlung im Temperaturbereich zwischen -20 und -65 °C infolge Gefrierens des Porenwassers größere Expansionen als normalgelagerter Leichtbeton.
3. Die nach vollständiger Erwärmung auf $+20$ °C verbleibende irreversible Restdehnung ist um so größer, je höher die Leicht-

betonfeuchte ist. Die irreversible Gefügebraufweitung nimmt mit jedem Tieftemperaturzyklus zu.

4. Leichtbeton mit Leichtzuschlägen höherer Kernfeuchte zeigt beim Gefrierprozeß größere Gefügebraufweitungen als Leichtbeton mit Leichtzuschlägen geringerer Kernfeuchte.

Festigkeit und Verformung bei tiefen Temperaturen

1. Zylinderdruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und E-Modul von Konstruktionsleichtbeton nehmen mit sinkender Prüftemperatur zu.
2. Die Festigkeiten β_c und β_{sz} sind um so größer, je höher der Feuchtegehalt des Konstruktionsleichtbetons ist.
3. Eine eindeutige Abhängigkeit der auf $+20^\circ\text{C}$ bezogenen Tieftemperaturfestigkeiten von der Lagerungsart und damit auch von der relativen Feuchte ist nicht erkennbar. Der prozentuale Festigkeitsanstieg beträgt bei
Zylinderdruckfestigkeit ca. 160 bis 190 %,
Spaltzugfestigkeit ca. 125 bis 160 %,
Elastizitätsmodul ca. 150 bis 190 %.
4. Konstruktionsleichtbeton zeigt über den gesamten Tieftemperaturbereich ein ausgeprägtes linear-elastisches und sprödes Verformungsverhalten.
5. Die untersuchten Konstruktionsleichtbetone weisen im Temperaturbereich -40 bis -80°C den Maximalwert der Bruchdehnung auf. Bei -170°C beträgt die Bruchdehnung ca. 80 bis 100 % der bei $+20^\circ\text{C}$ gemessenen.

Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

1. Zylinderdruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und E-Modul erleiden nach Tieftemperaturzyklen - bei Raumtemperatur untersucht - erhebliche Einbußen. Die Einbußen wachsen mit jedem Temperaturzyklus.

2. Die Festigkeitsverluste sind um so größer, je höher die Feuchtigkeit des Konstruktionsleichtbetons ist.
3. Die Restfestigkeiten des normalgelagerten Konstruktionsleichtbetons betragen ca. 80 bis 100 %. Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von versiegeltem Leichtbeton fallen auf ca. 50 % bzw. 30 %, der E-Modul sogar bis auf ca. 20 % ab.
4. Die bei +20 °C gemessenen Bruchdehnungen nehmen im Anschluß an Temperaturzyklen zu, und zwar um so mehr, je höher die Leichtbetonfeuchte ist.
5. Eine höhere Kernfeuchte der Leichtzuschläge führt nach Tieftemperaturzyklen zu größeren Festigkeits- und Steifigkeitsverlusten als eine geringere Kernfeuchte.

Die Untersuchungen ergeben, daß Konstruktionsleichtbeton z.T. ein ähnliches Tieftemperaturverhalten wie Normalbeton besitzt. Auch beim Leichtbeton stellt sich der Feuchtegehalt als wichtigster Einflußparameter heraus. Die Zementleimmenge hat nach den vorliegenden Ergebnissen eine vergleichsweise geringe Auswirkung.

Von großer Bedeutung ist hier die Höhe der Kernfeuchte des Leichtzuschlags. Bei der Abkühlung von +20 °C auf -170 °C gefriert im Leichtbeton neben dem Porenwasser des Zementsteins auch das Porenwasser im Leichtzuschlag. Die Menge des Kornporenwassers hängt i.w. von der Porosität und von der Porenstruktur, die das Saugvermögen bestimmen und von der beim Betonieren vorhandenen Gesamtwassermenge ab (Lagerungsfeuchte der Leichtzuschläge, gesamtes Zugabewasser bei der Herstellung des Leichtbetons). Porosität und Saugvermögen variieren für die verschiedenen Kornfraktionen des Leichtzuschlags, deren Kornrohichte meist durchmesserabhängig ist. Bei den in dieser Pilotstudie untersuchten Leichtbetonen wurde eine einheitliche Kornzusammensetzung gewählt. Aus diesen Gründen erscheinen vergleichende Tieftemperaturuntersuchungen an Konstruktionsleichtbetonen mit unterschiedlichen Kornzusammensetzungen als unbedingt erforderlich.

7. LITERATUR

- /1/ Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton. Diss. TU Braunschweig, 1982
- /2/ Joto, Y., Miura, T.: Experimental studies on properties of concrete cooled to about minus 160 °C. Technology Reports, Thoku University, Vol. 44, No. 2, 1979
- /3/ Rostásy, F.S.: Verfestigung und Versprödung von Beton durch tiefe Temperaturen. Festschrift zum 60. Geburtstag von Gallus Rehm

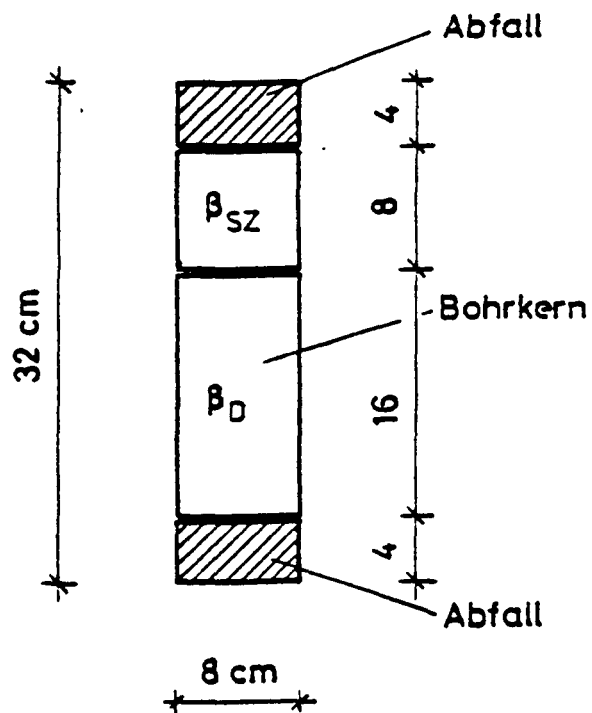
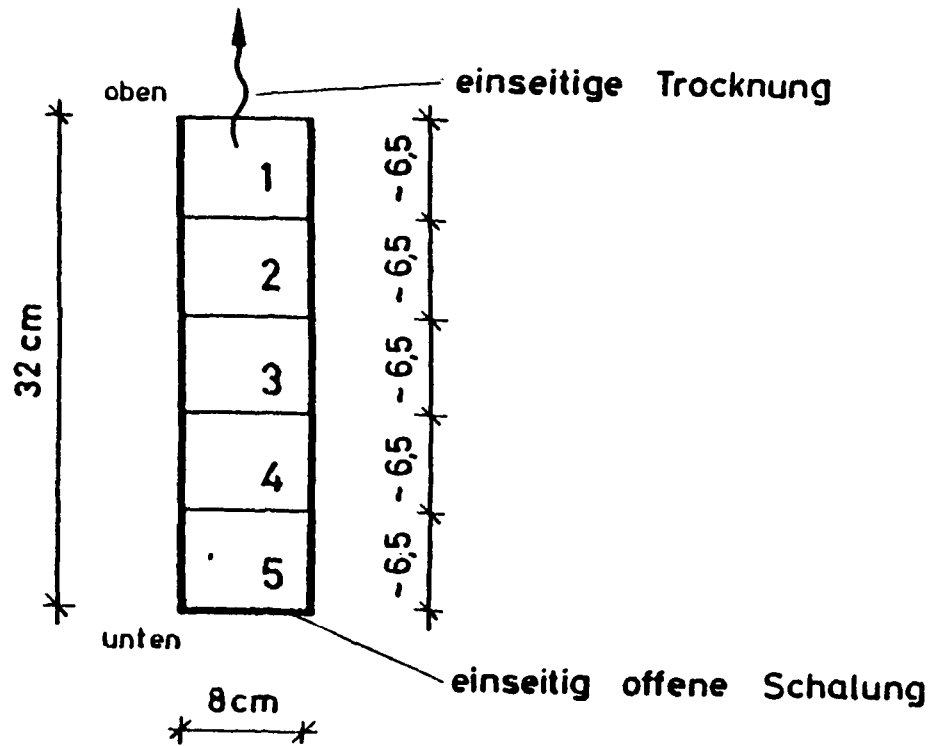


Bild 1: Geometrie der Leichtbetonkörper mit den Lagerungen "20 °C/65 % r.F." (normal) und "versiegelt"



Abschnitt	u(x) [M.-%] der Proben			
	AK	BK	CK	DK
1	(9,5)	(9,3)	(12,3)	(12,1)
2	11,1	10,8	14,0	14,4
3	11,3	11,0	14,1	14,4
4	11,4	11,1	14,0	14,5
5	11,6	10,9	14,1	14,5
Mittelwert u_m ohne Abschn. 1	11,3	10,9	14,0	14,4

Bild 2: Verteilung der Betonfeuchte über die Probenhöhe der Leichtbetonkörper mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung " (K)

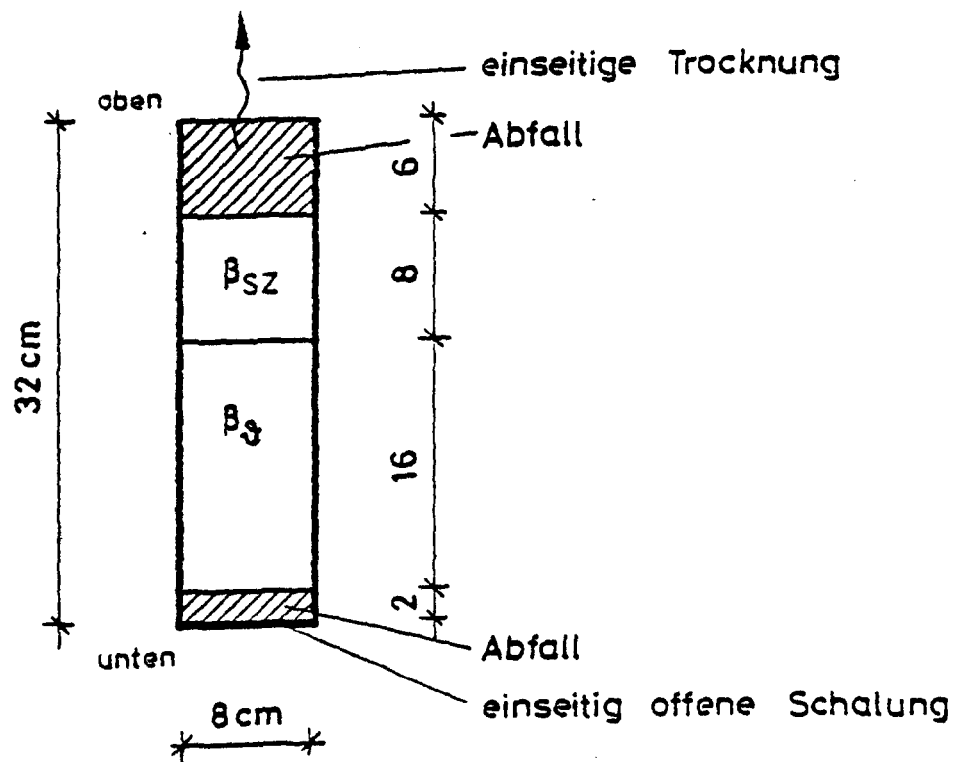
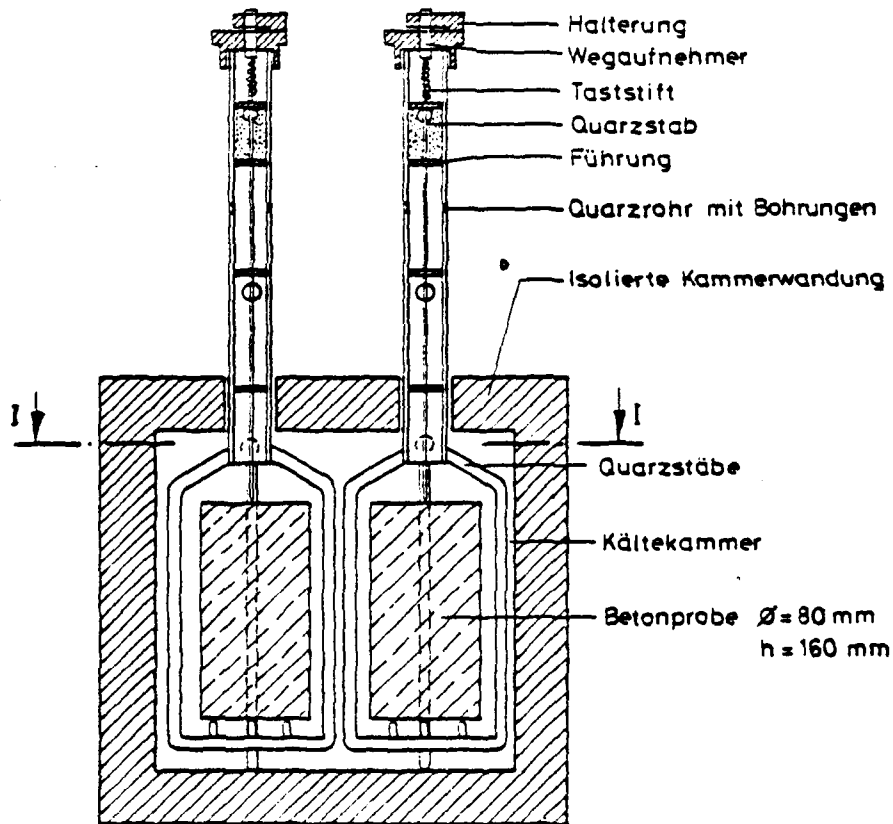


Bild 3: Geometrie der Leichtbetonkörper mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" (K)

Messung von Temperaturdehnungen von Beton bei
sehr tiefen Temperaturen



Schnitt I-I

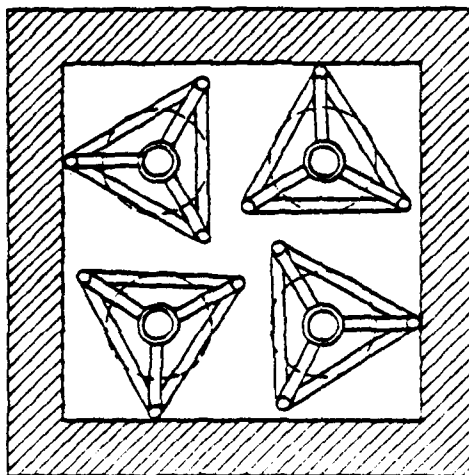


Bild 4: Schematische Darstellung eines Tieftemperatur-Dilatometers für Leichtbetonkörper

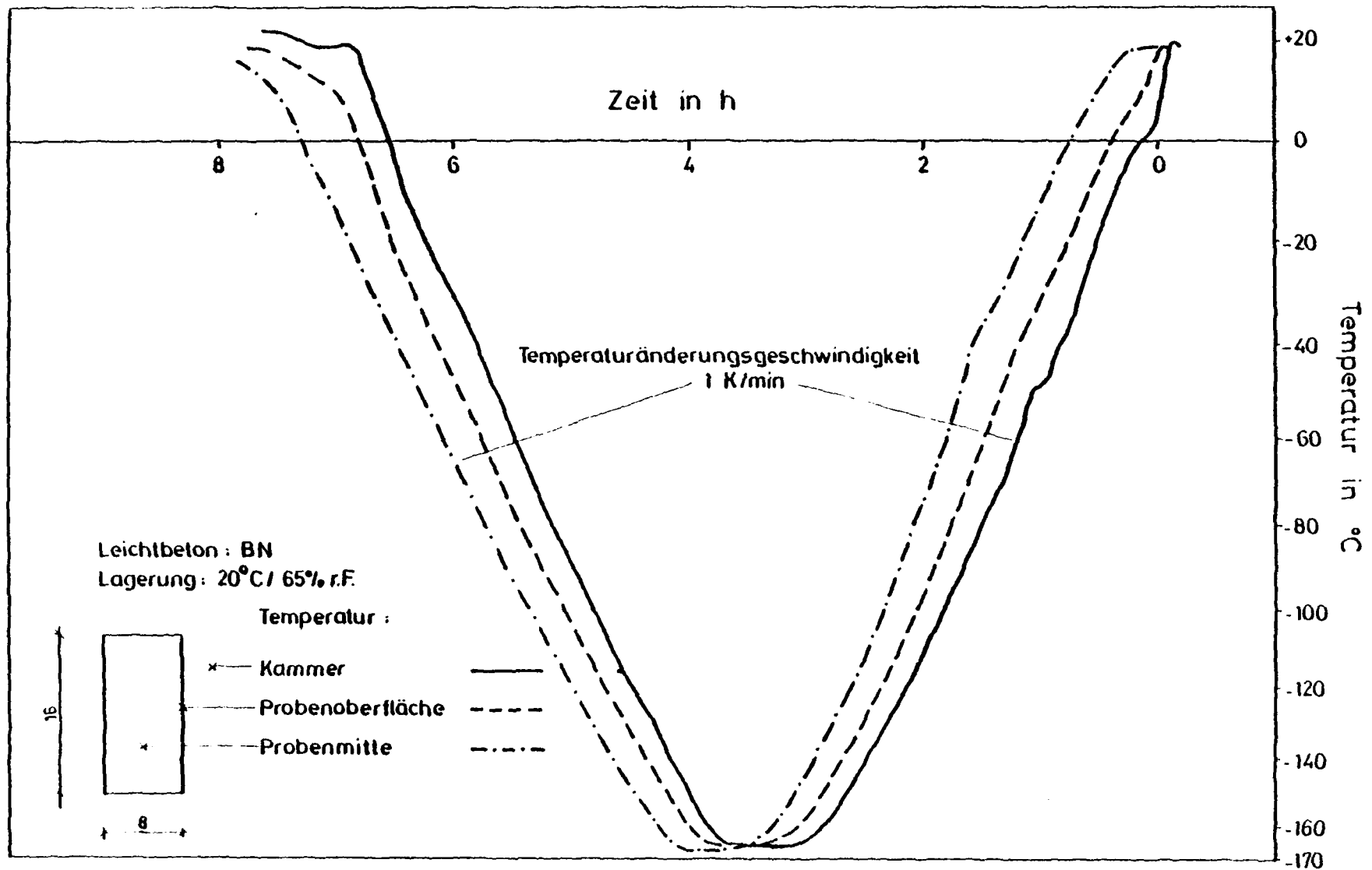


Bild 5: Temperaturverläufe während eines Temperaturzyklus

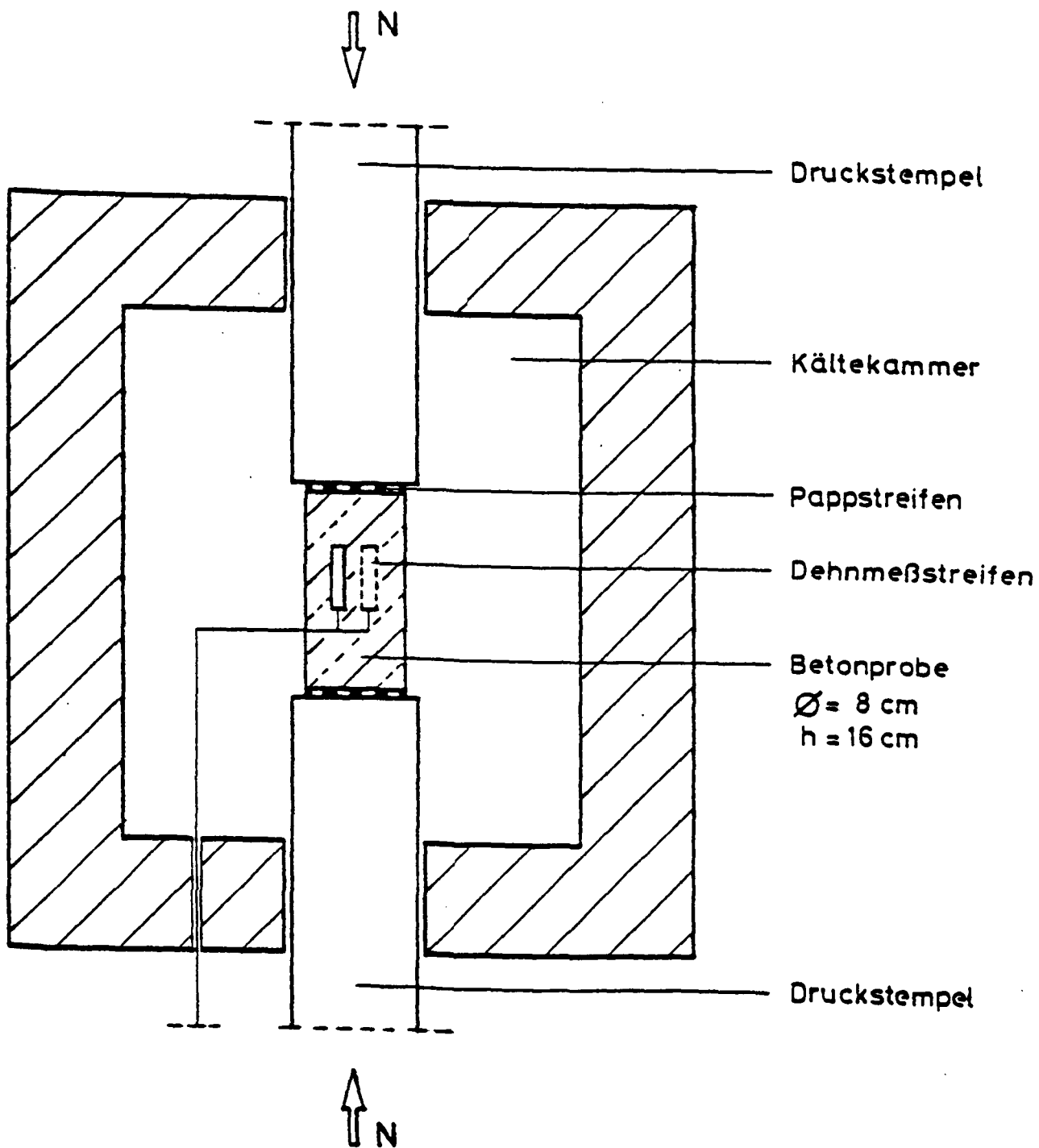


Bild 6: Messung lastabhängiger Dehnungen bei tiefen Temperaturen

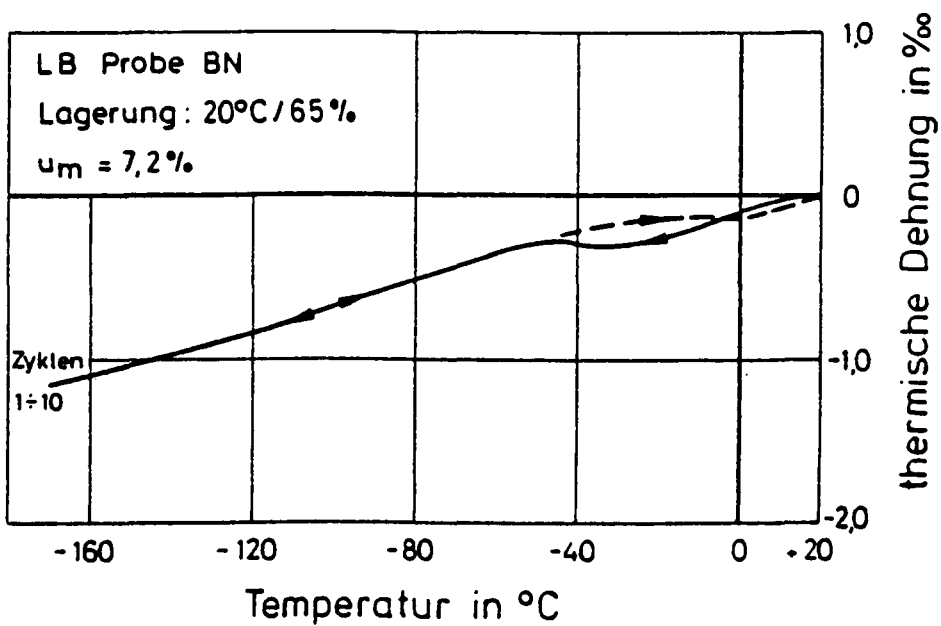
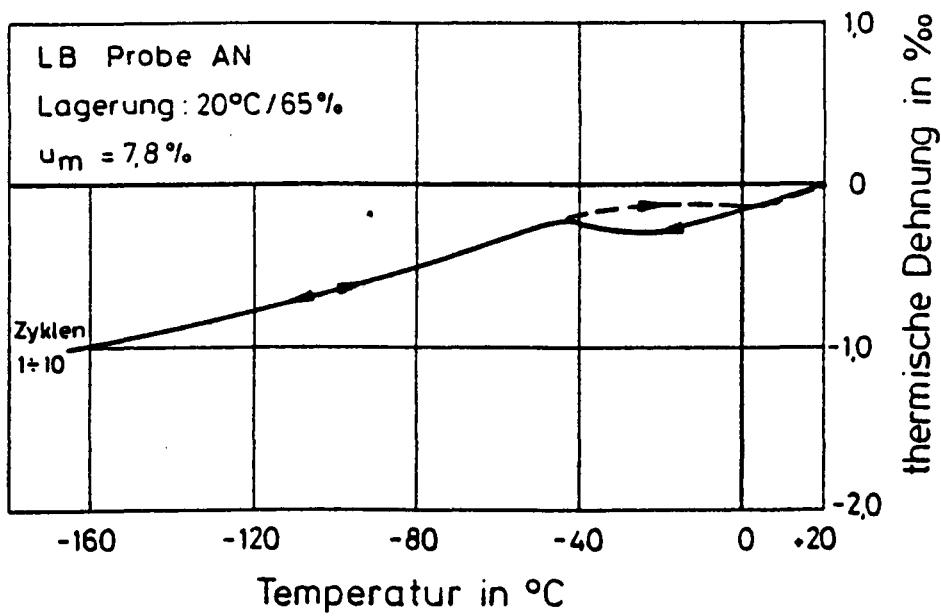


Bild 7: Thermische Dehnung von normalgelagertem Konstruktionsleichtbeton (Proben AN, BN) während 10 Tief-temperaturzyklen

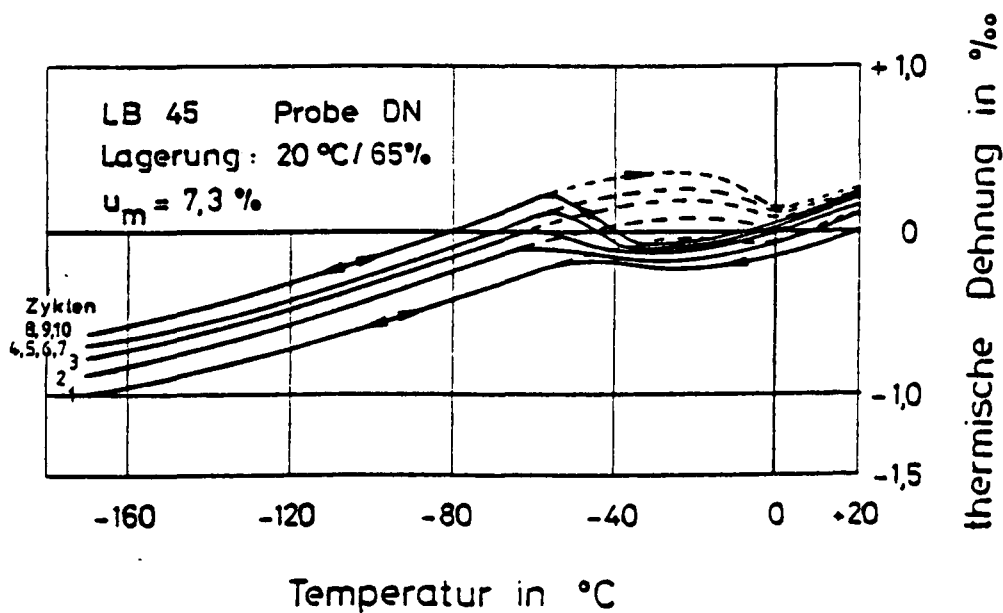
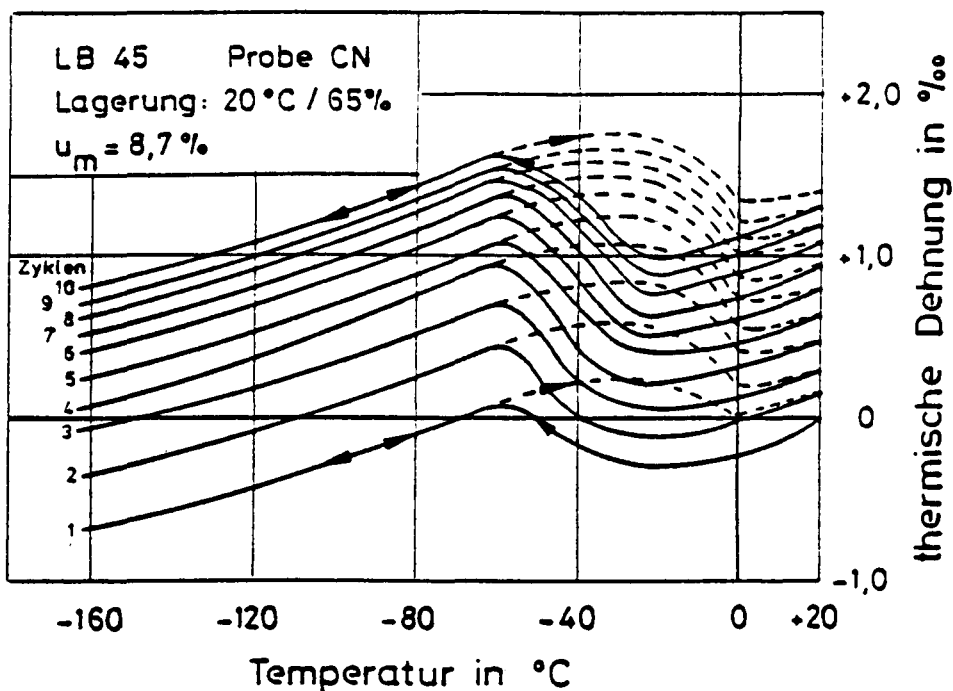


Bild 8: Thermische Dehnung von normalgelagertem Konstruktionsleichtbeton (Proben CN, DN) während 10 Tieftemperaturzyklen

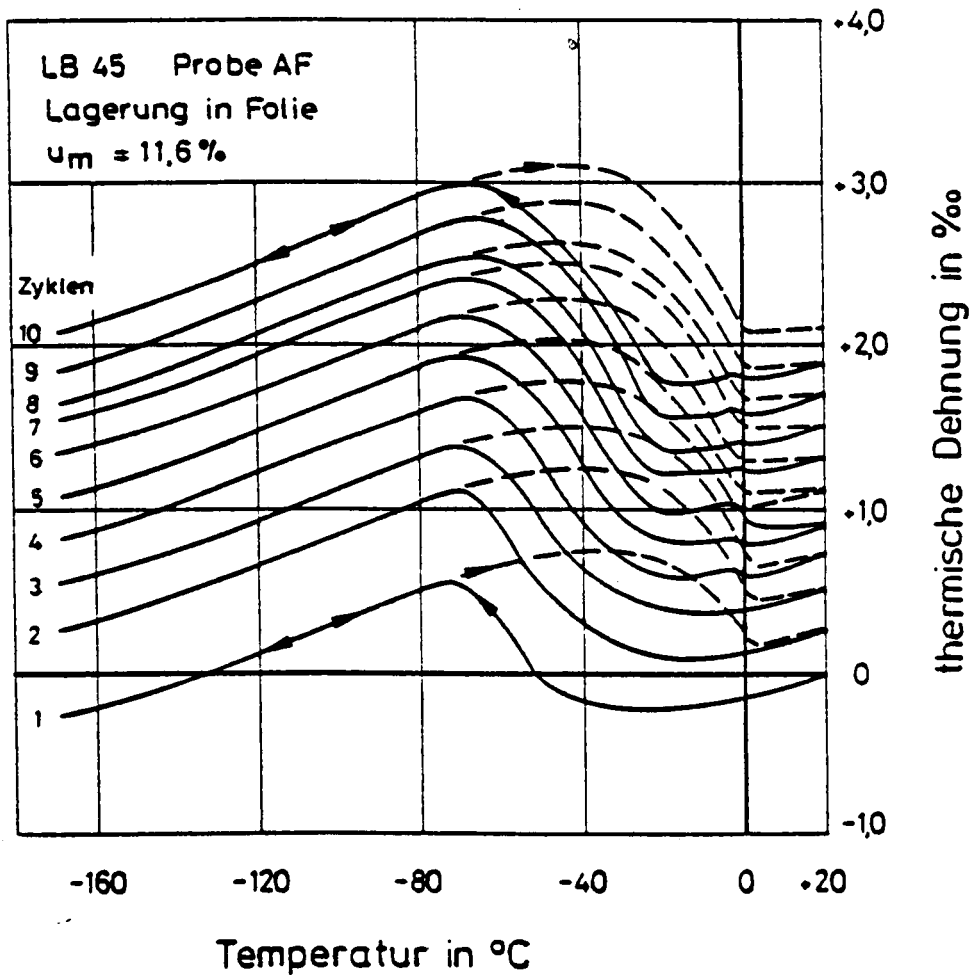


Bild 9: Thermische Dehnung von versiegeltem Konstruktionsleichtbeton (Probe AF) während 10 Tieftemperaturzyklen

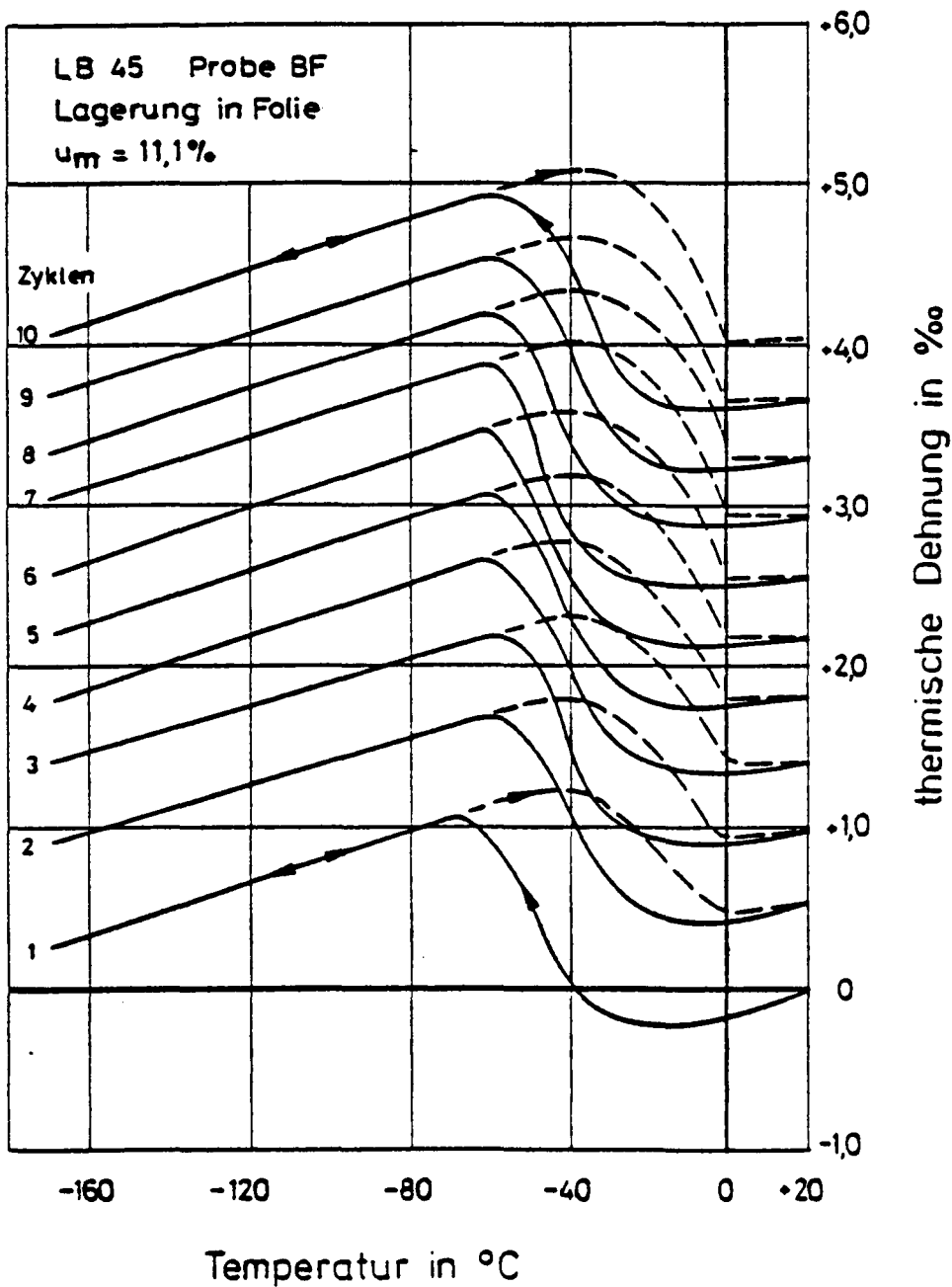


Bild 10: Thermische Dehnung von versiegeltem Konstruktionsleichtbeton (Probe BF) während 10 Tieftemperaturzyklen

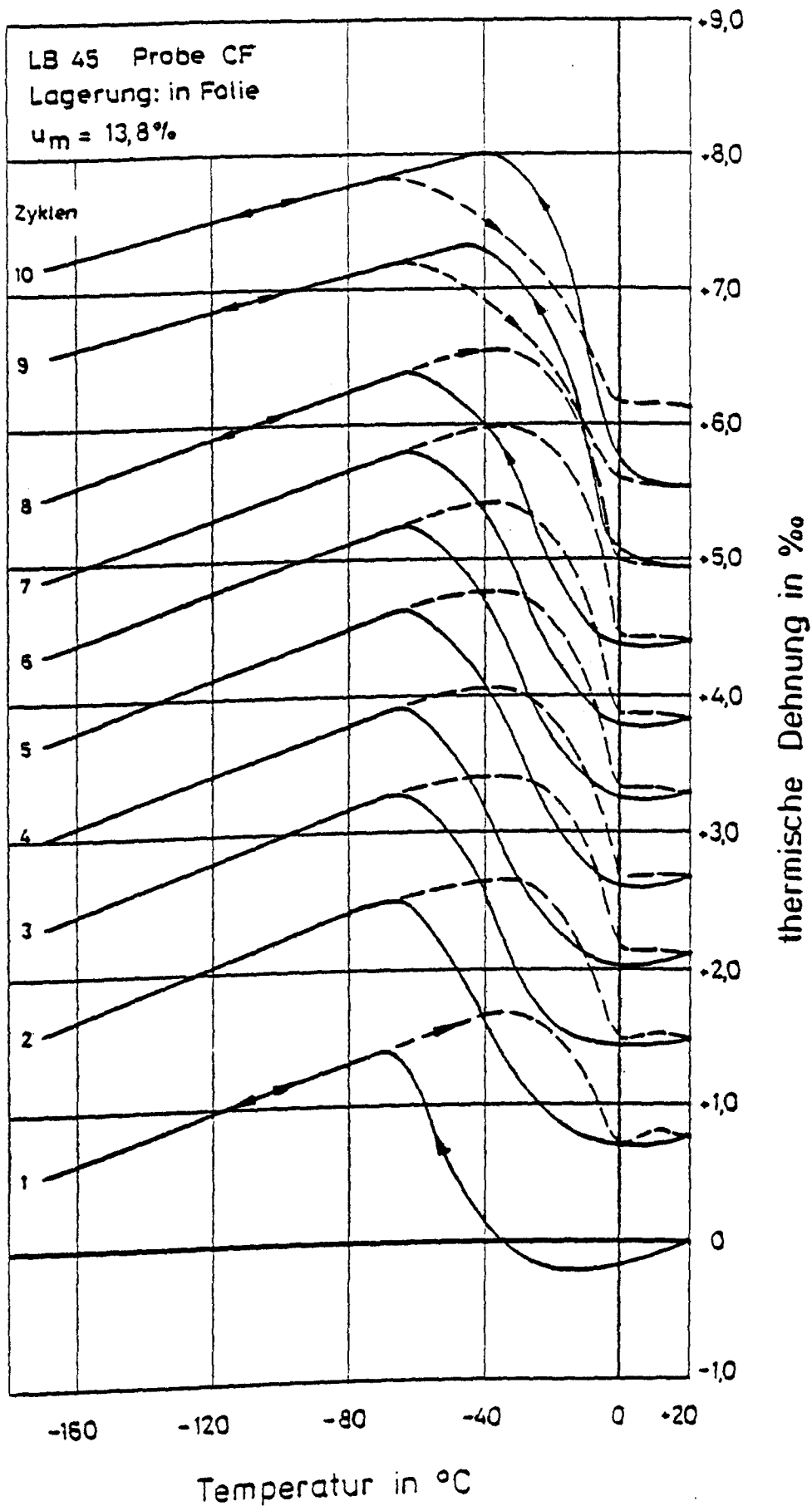


Bild 11: Thermische Dehnung von versiegeltem Konstruktionsleichtbeton (Probe CF) während 10 Tieftemperaturzyklen

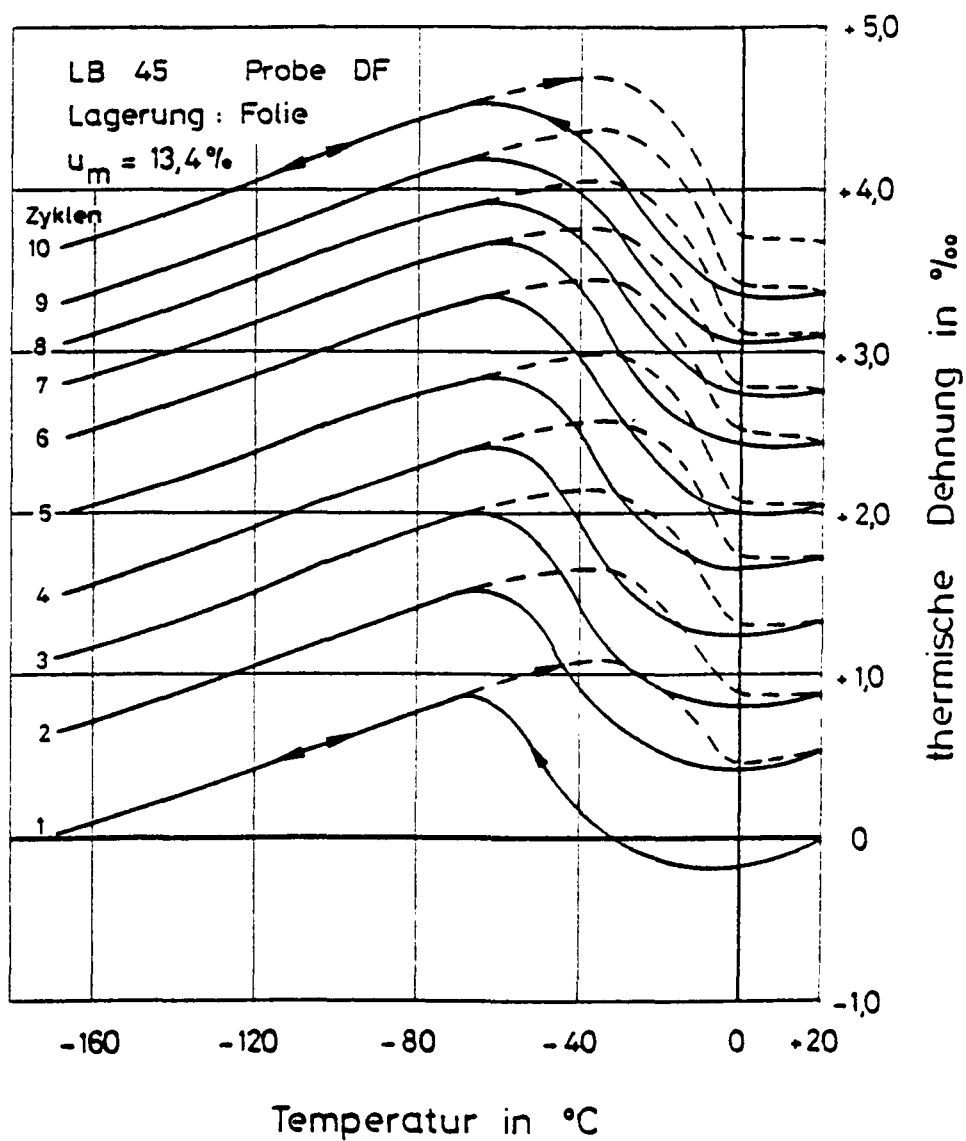


Bild 12: Thermische Dehnung von versiegeltem Konstruktionsleicht-
beton (Probe DF) während 10 Tieftemperaturzyklen

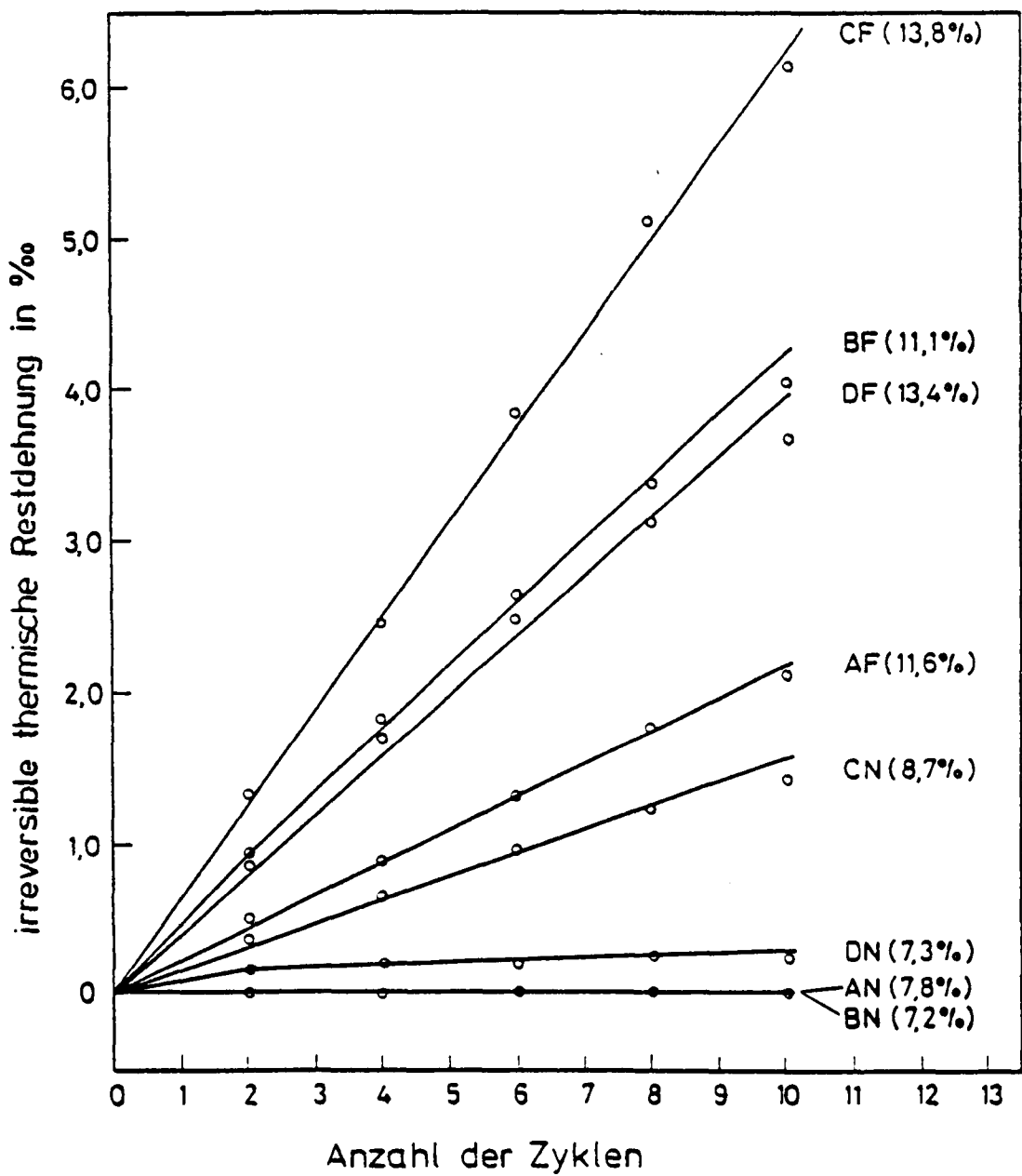


Bild 13: Irreversible thermische Restdehnung in Abhängigkeit von der Anzahl der Tieftemperaturzyklen

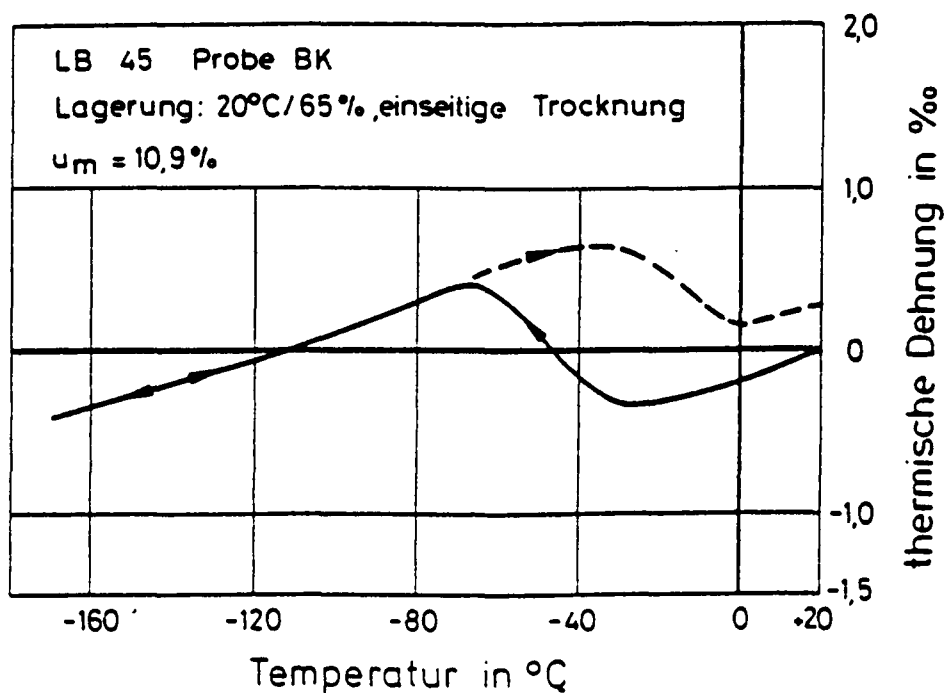
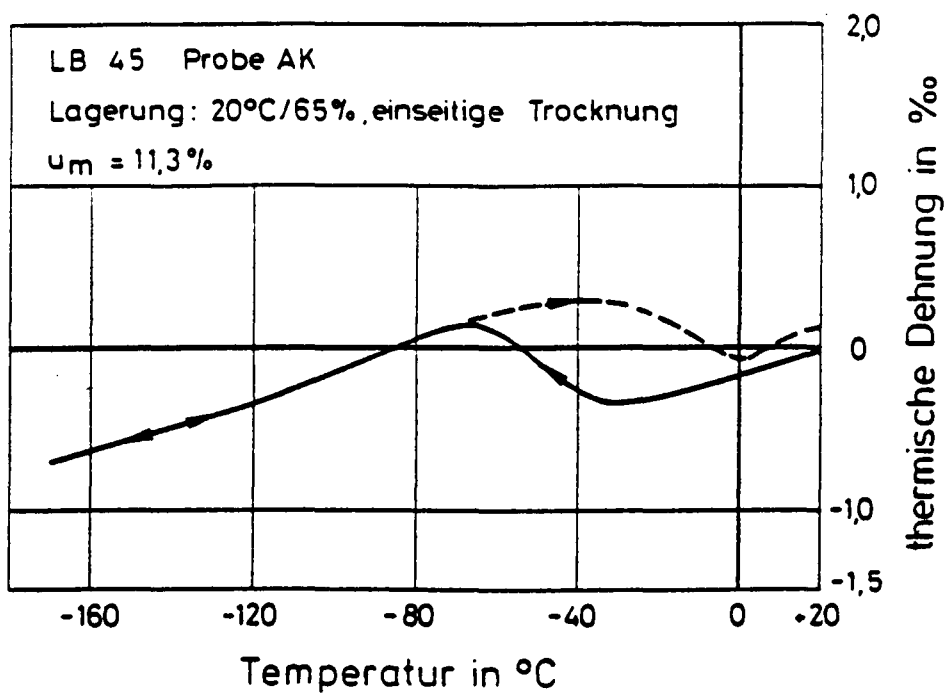


Bild 14: Thermische Dehnung von Konstruktionsleichtbeton (Proben AK, BK) mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" während eines Zyklus

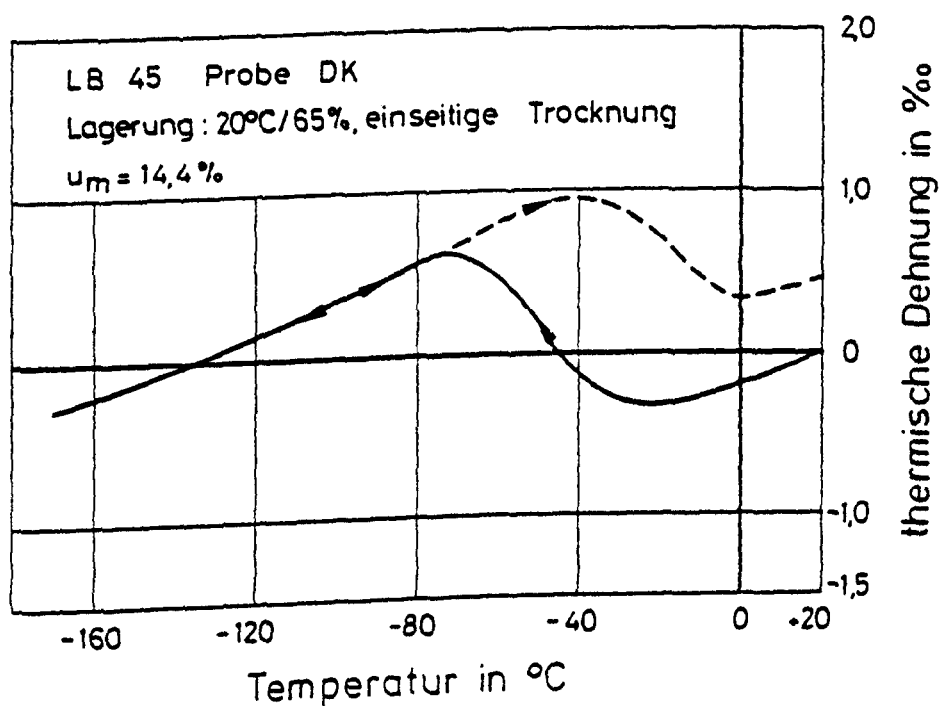
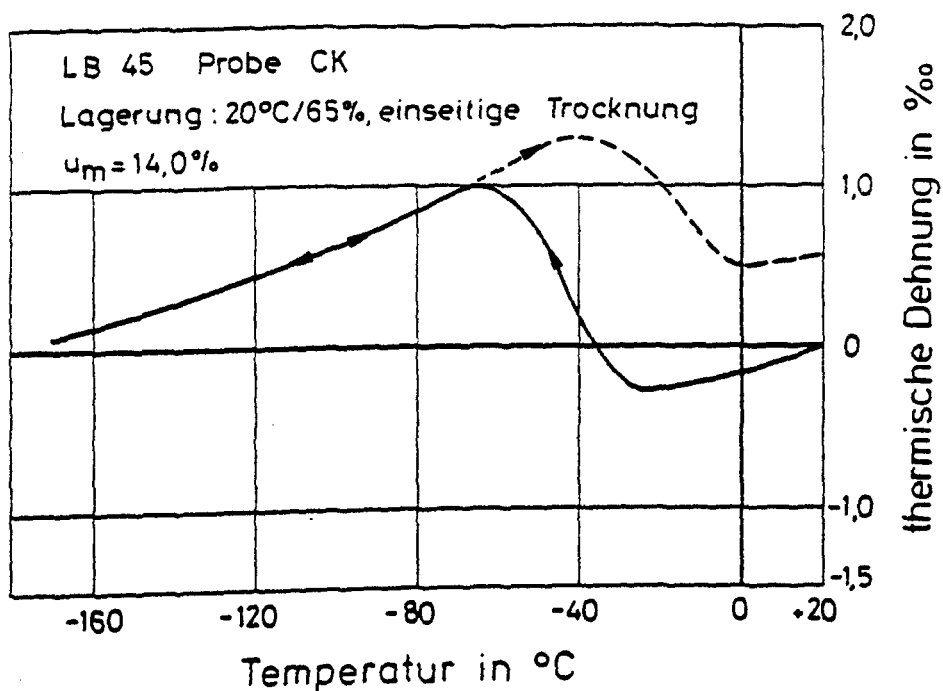


Bild 15: Thermische Dehnung von Konstruktionsleichtbeton (Proben CK, DK) mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" während eines Zyklus

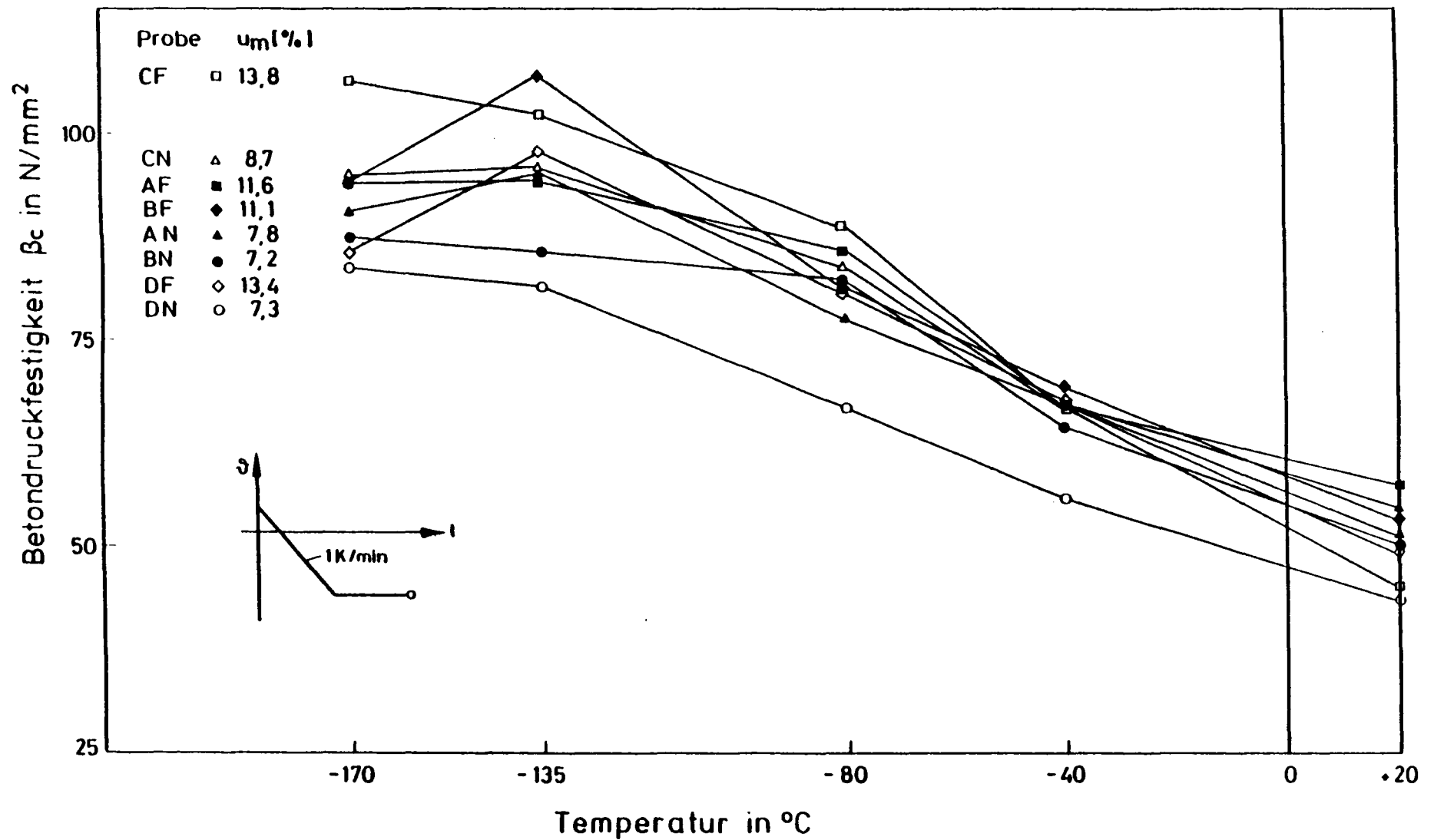


Bild 16: Zylinderdruckfestigkeit von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 im Tieftemperaturbereich

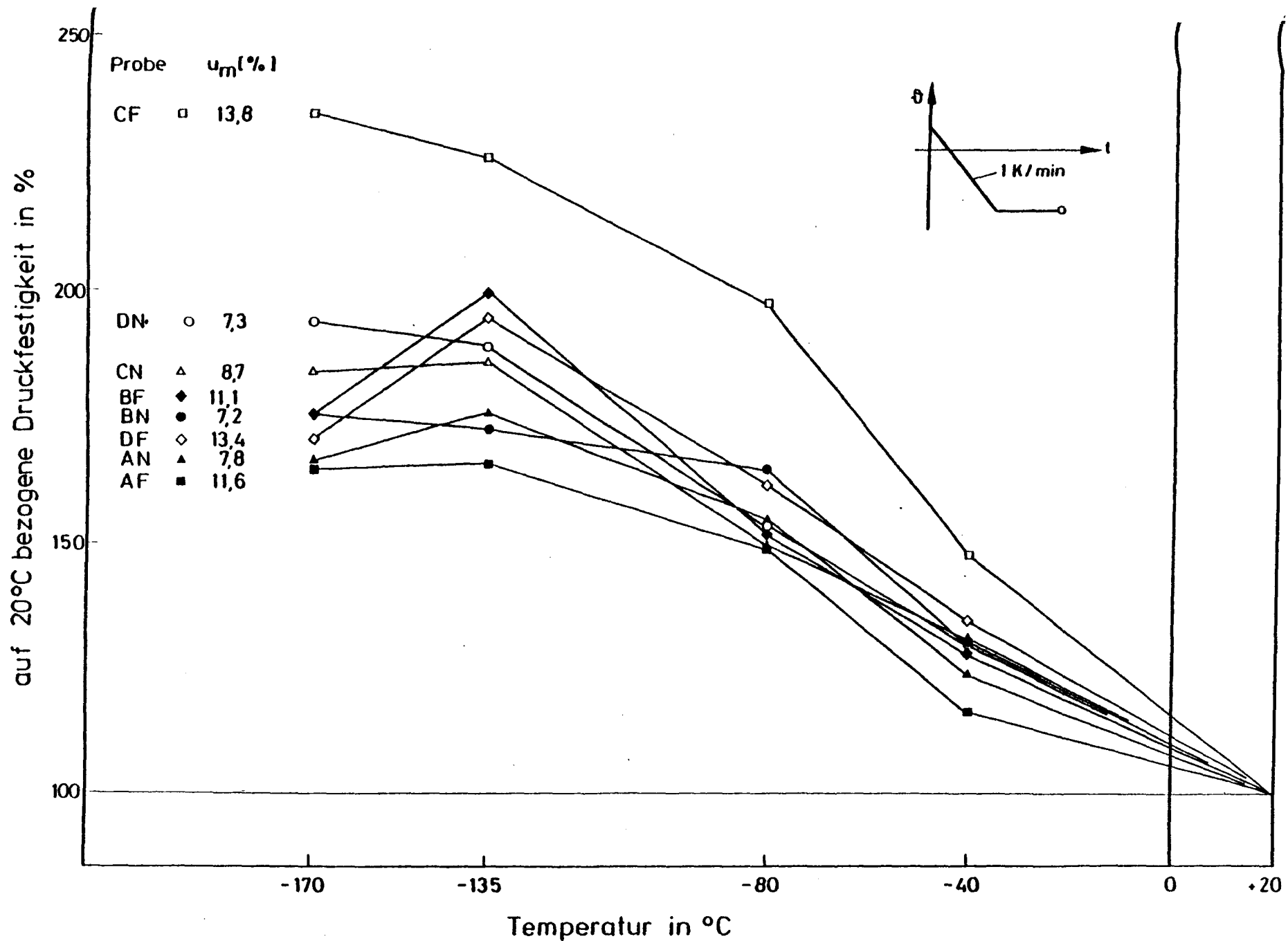


Bild 17: Bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\beta_c(\vartheta)/\beta_c(+20^\circ)$ von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 im Tieftemperaturbereich

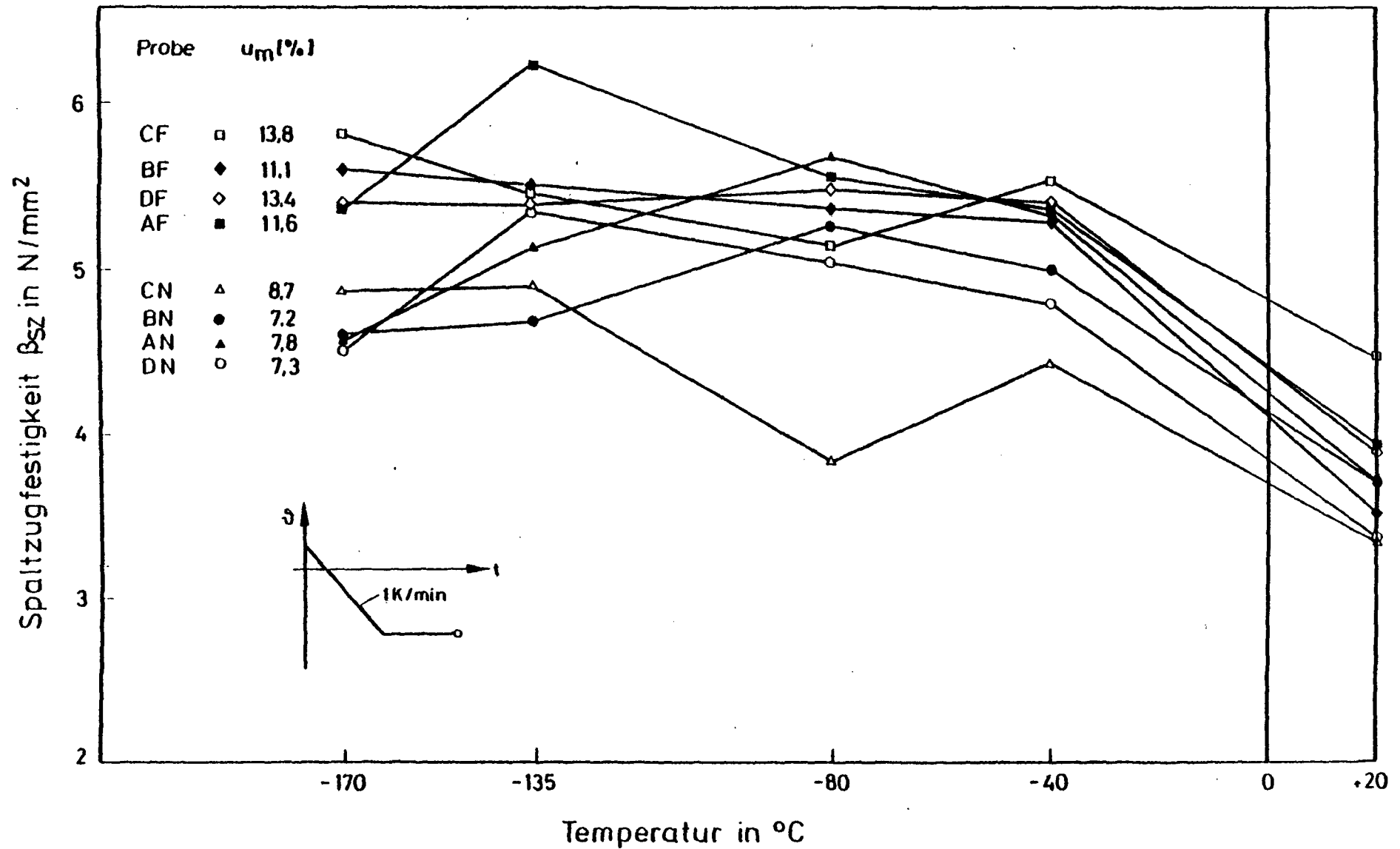


Bild 18: Spaltzugfestigkeit von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 im Tieftemperaturbereich

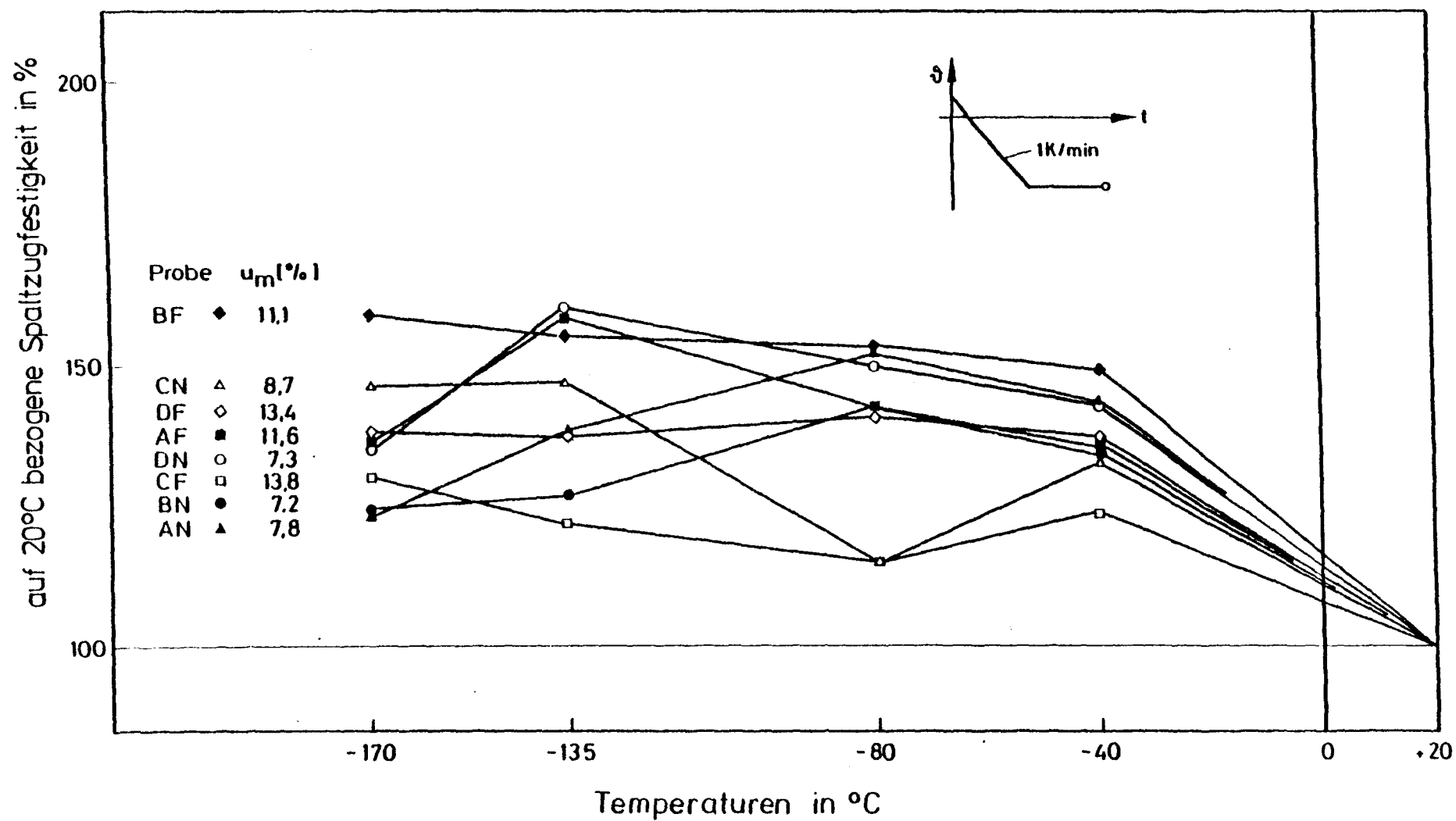


Bild 19: Bezogene Spaltzugfestigkeit $B_{SZ}(\vartheta)/B_{SZ}(+20^{\circ})$ von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 im Tieftemperaturbereich

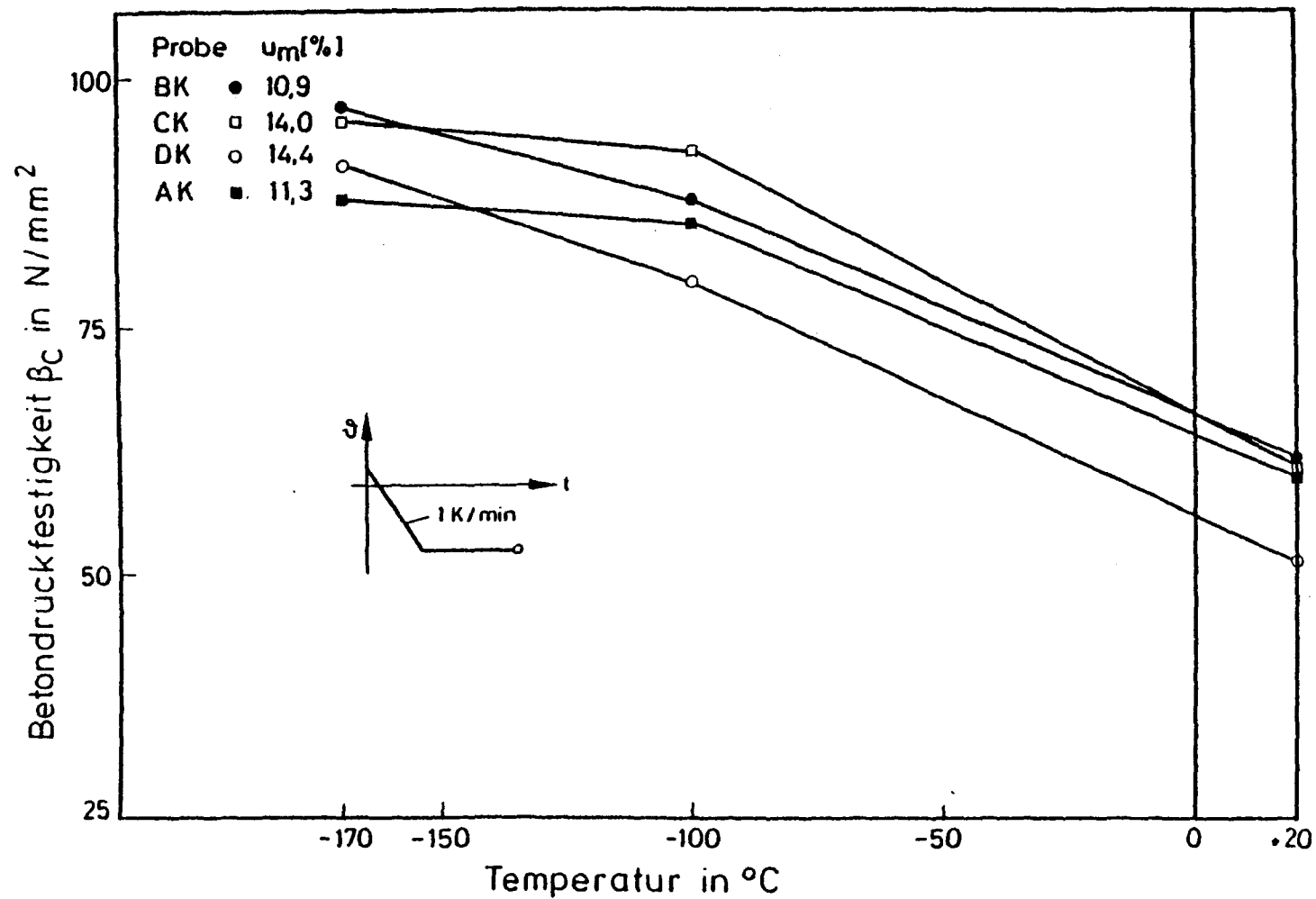


Bild 20: Zylinderdruckfestigkeit von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" im Tieftemperaturbereich

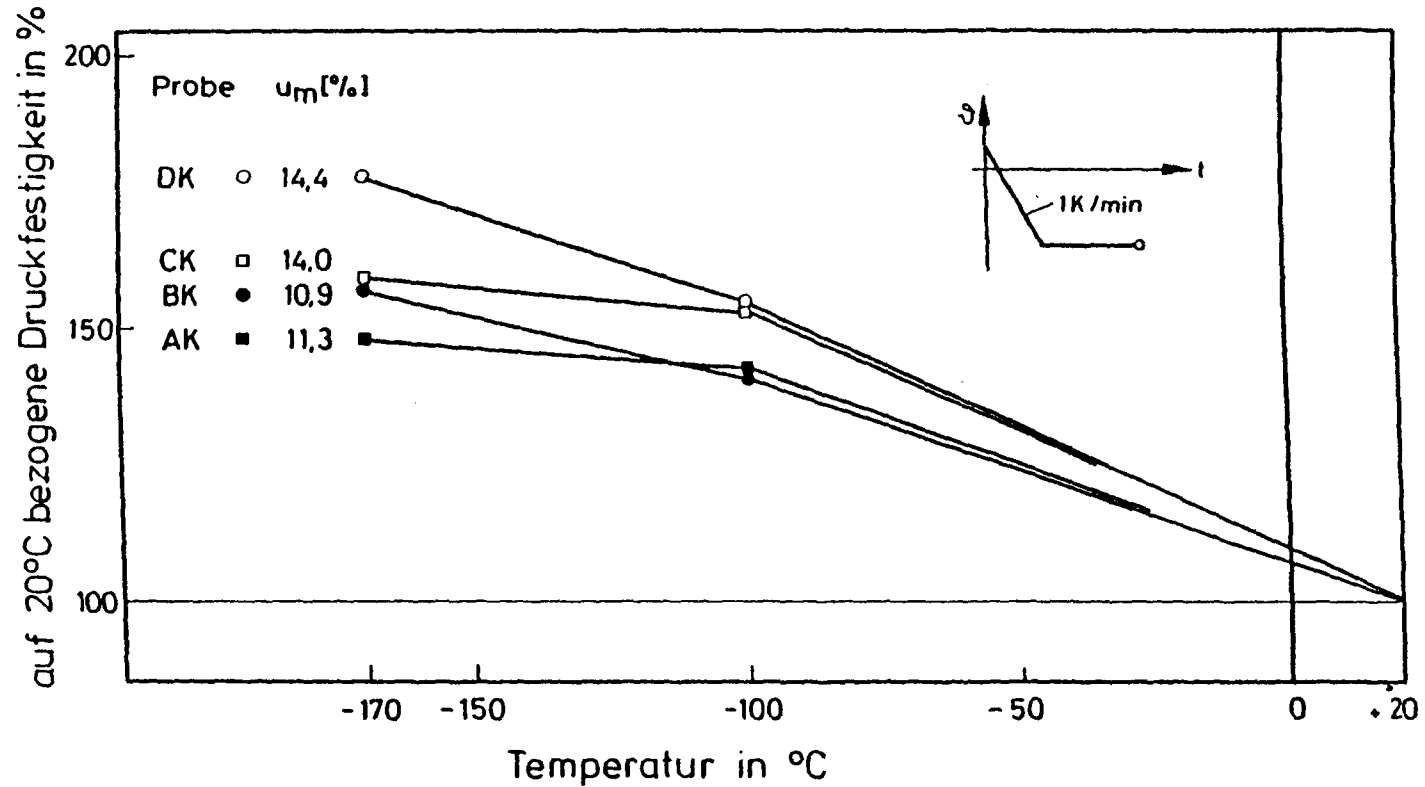


Bild 21: Bezogene Zylinderdruckfestigkeit $B_c(\vartheta)/B_c(+20^\circ)$ von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" im Tieftemperaturbereich

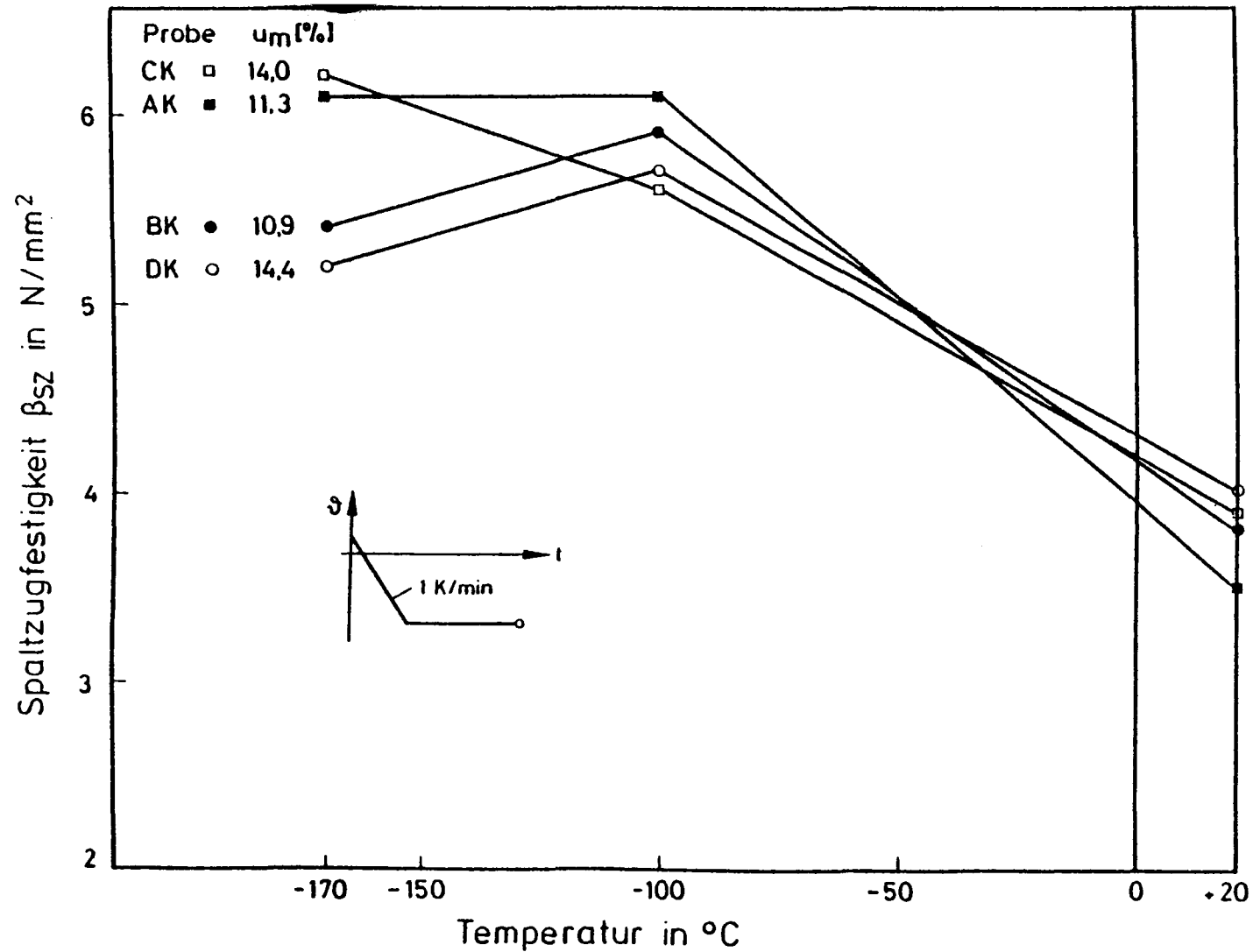


Bild 22: Spaltzugfestigkeit von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" im Tieftemperaturbereich

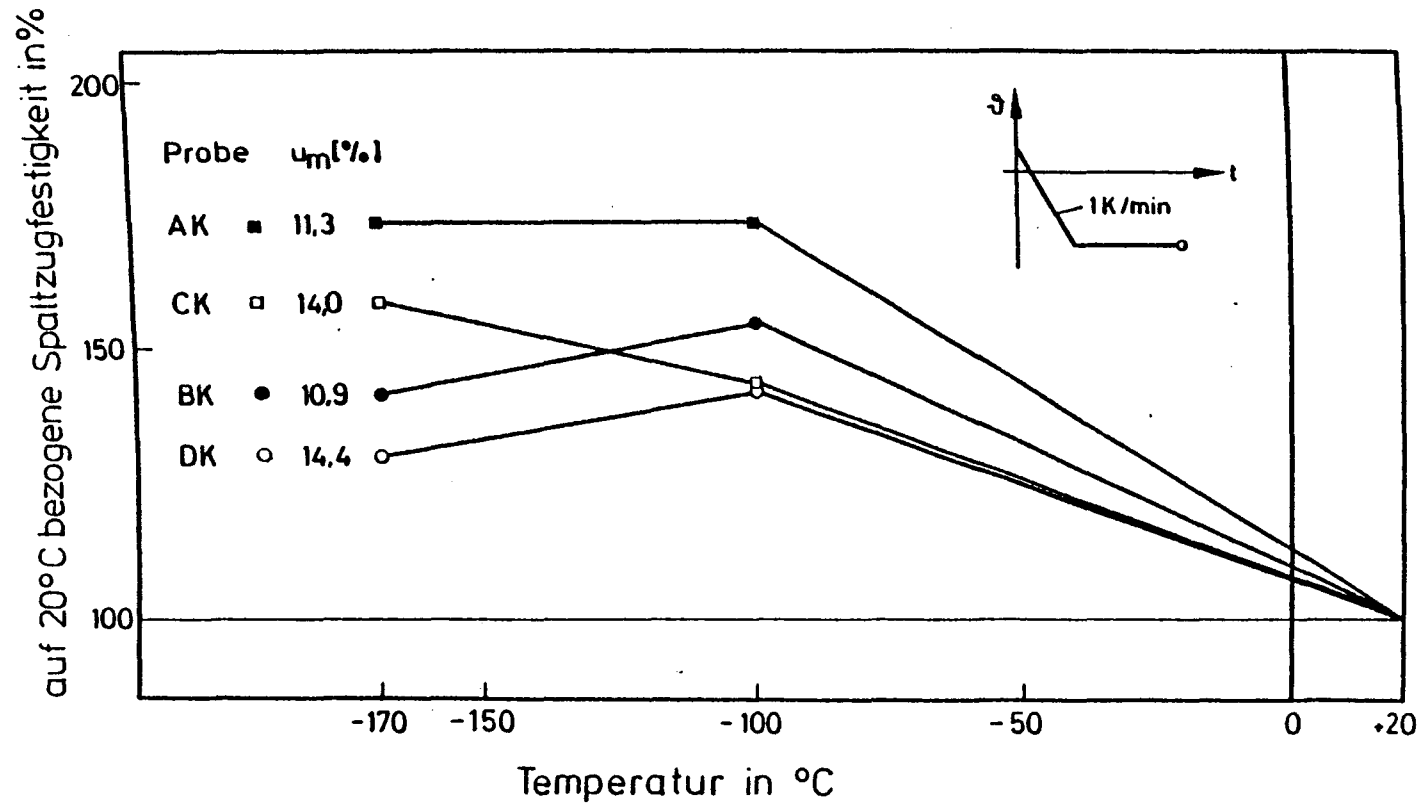


Bild 23: Bezogene Spaltzugfestigkeit $\beta_{SZ}(\vartheta)/\beta_{SZ}(+20^{\circ})$ von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" im Tieftemperaturbereich

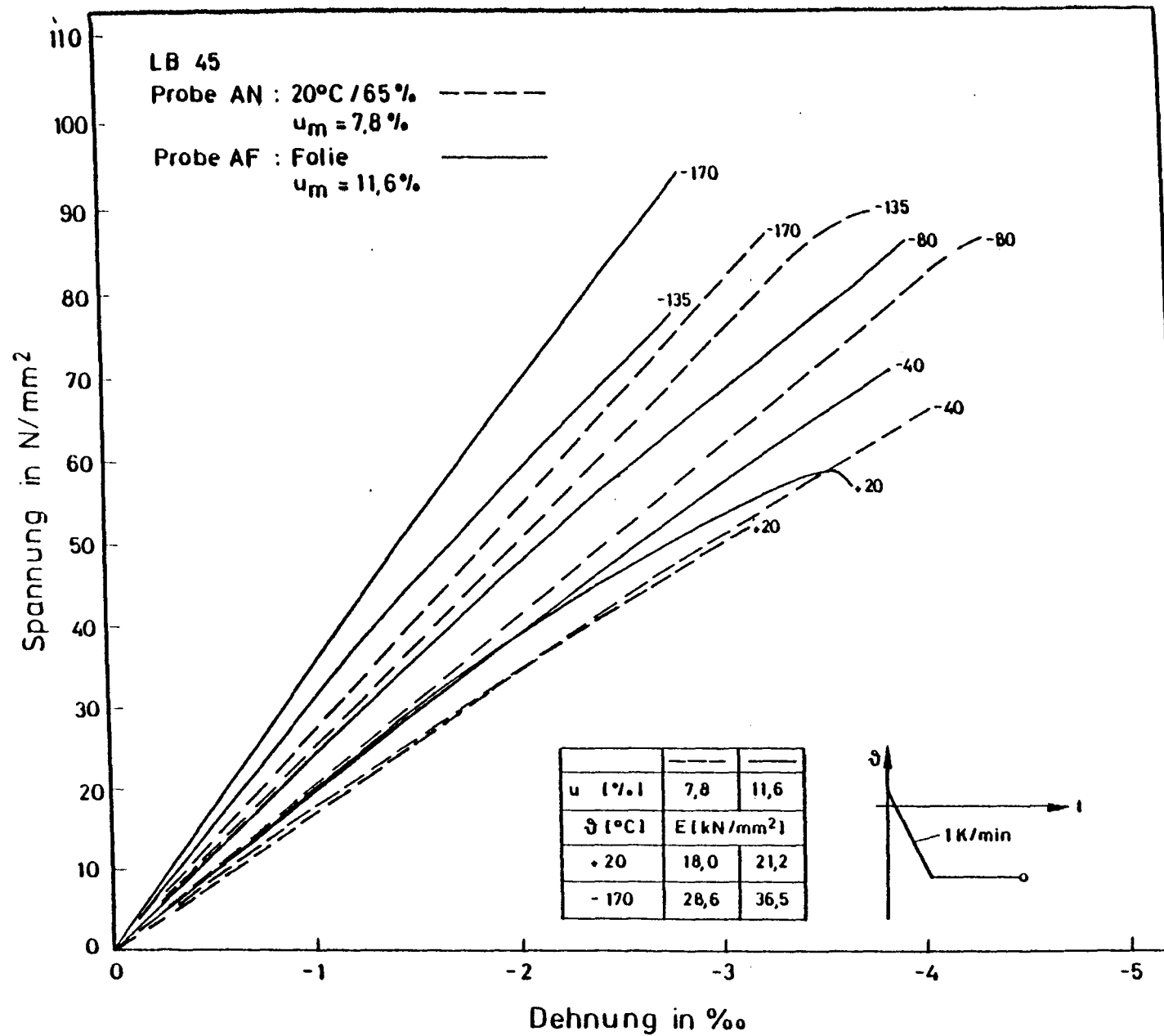


Bild 24: Spannungs-Dehnungs-Linien von Konstruktionsleichtbeton (Proben AN, AF) bei tiefen Temperaturen bei unterschiedlichem Feuchtegehalt

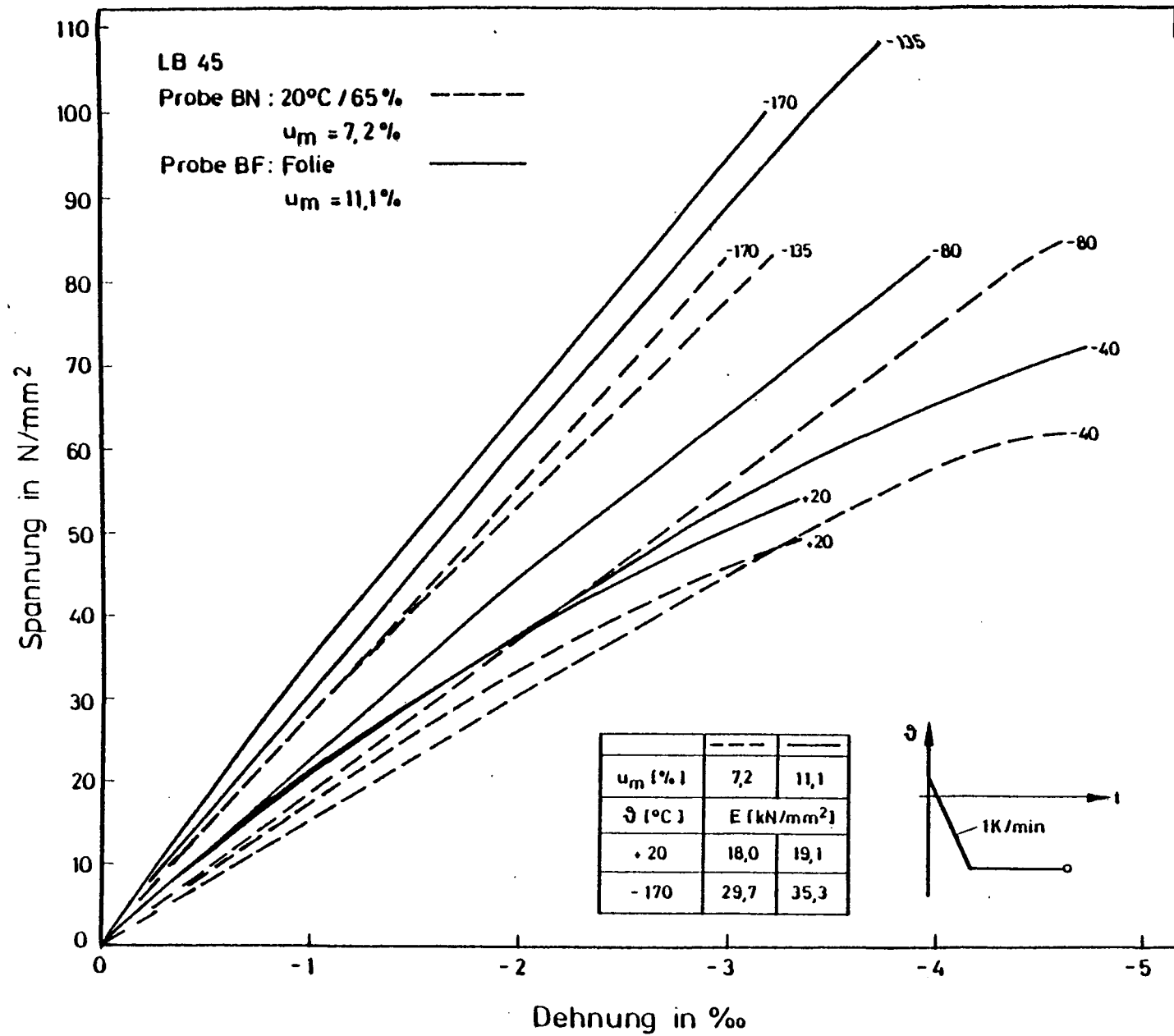


Bild 25: Spannungs-Dehnungs-Linien von Konstruktionsleichtbeton (Proben BN, BF) bei tiefen Temperaturen bei unterschiedlichem Feuchtegehalt

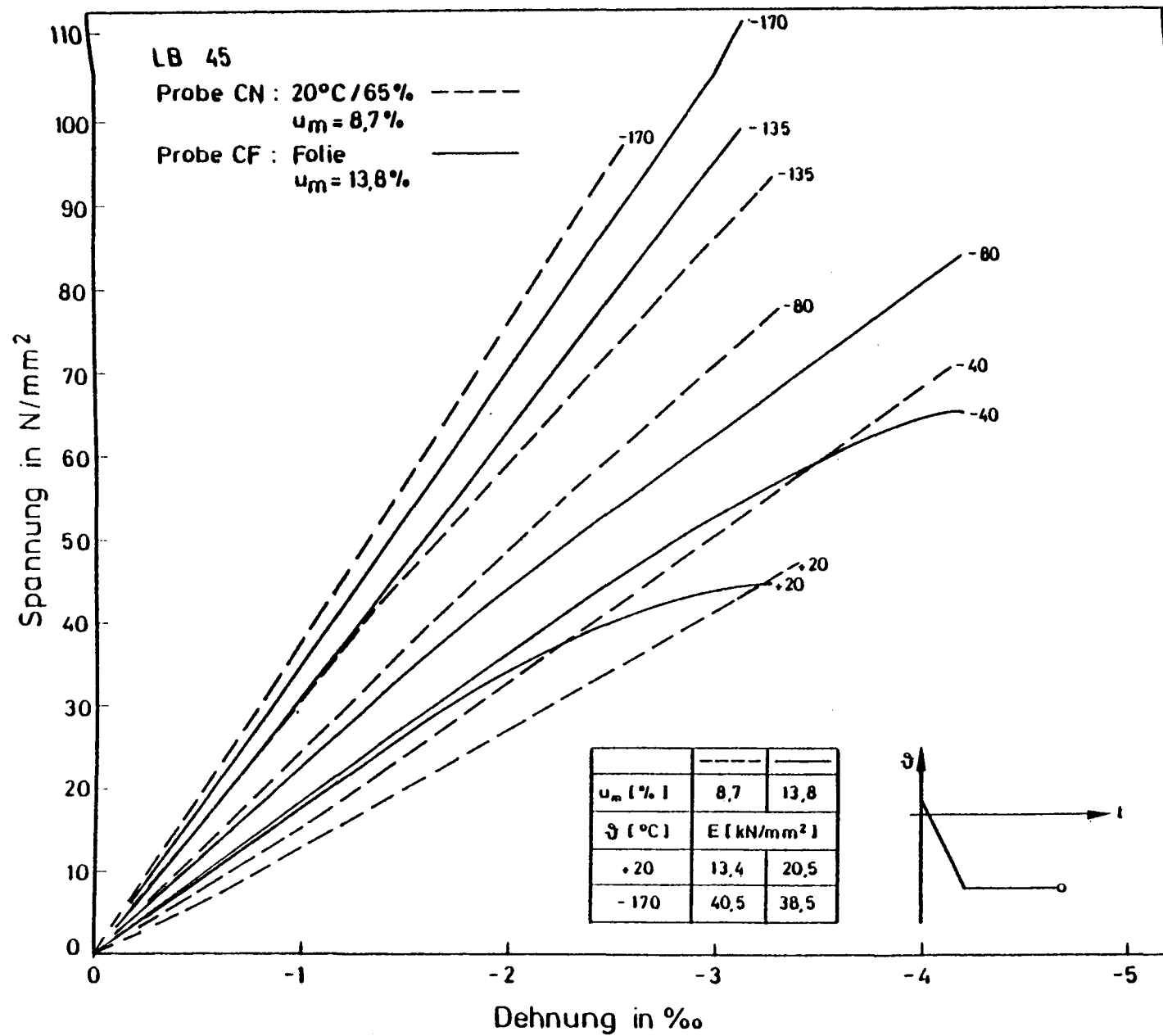


Bild 26: Spannungs-Dehnungs-Linien von Konstruktionsleichtbeton (Proben CN, CF) bei tiefen Temperaturen bei unterschiedlichem Feuchtegehalt

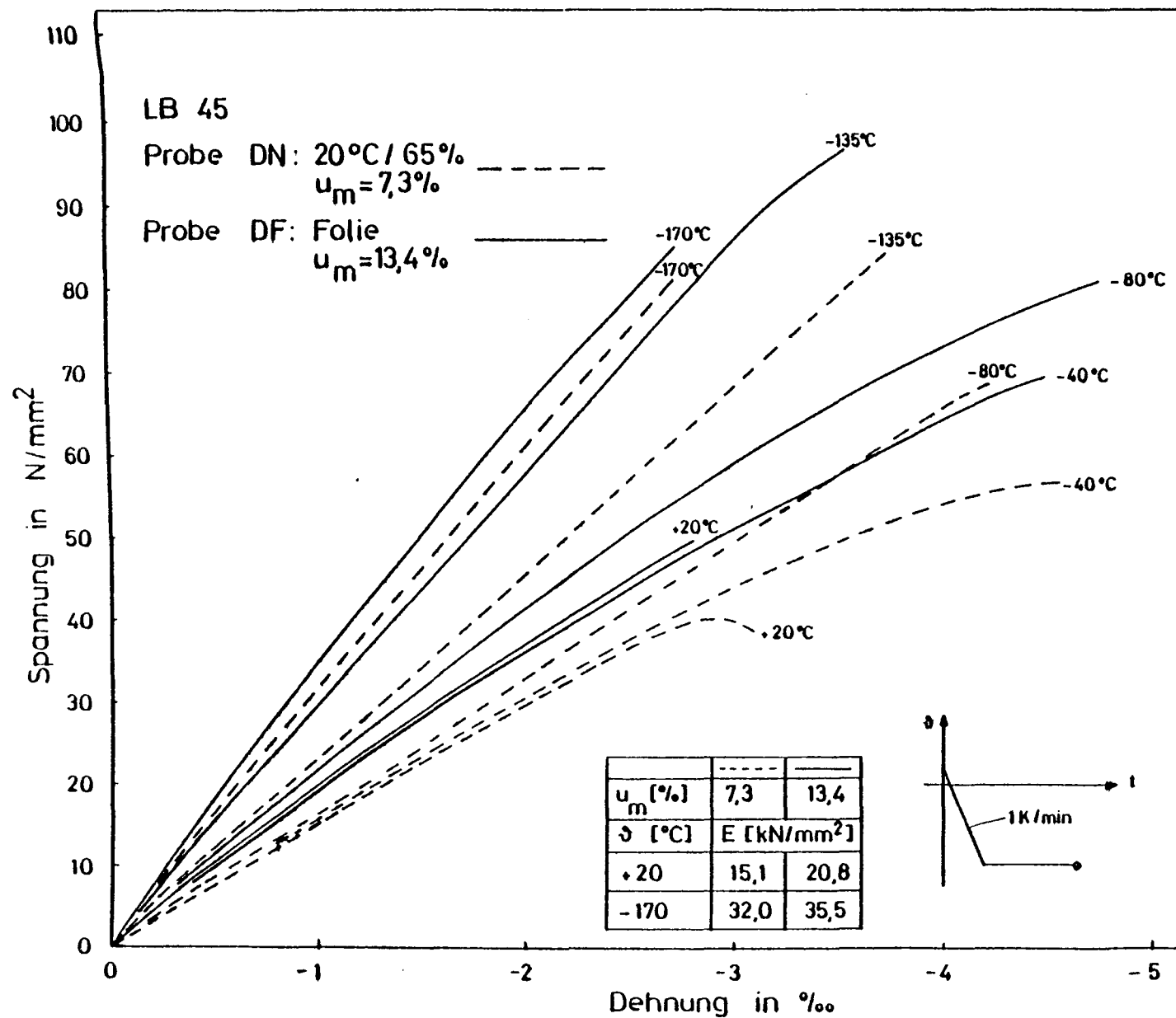


Bild 27: Spannungs-Dehnungs-Linien von Konstruktionsleichtbeton (Proben DN, DF) bei tiefen Temperaturen bei unterschiedlichem Feuchtegehalt

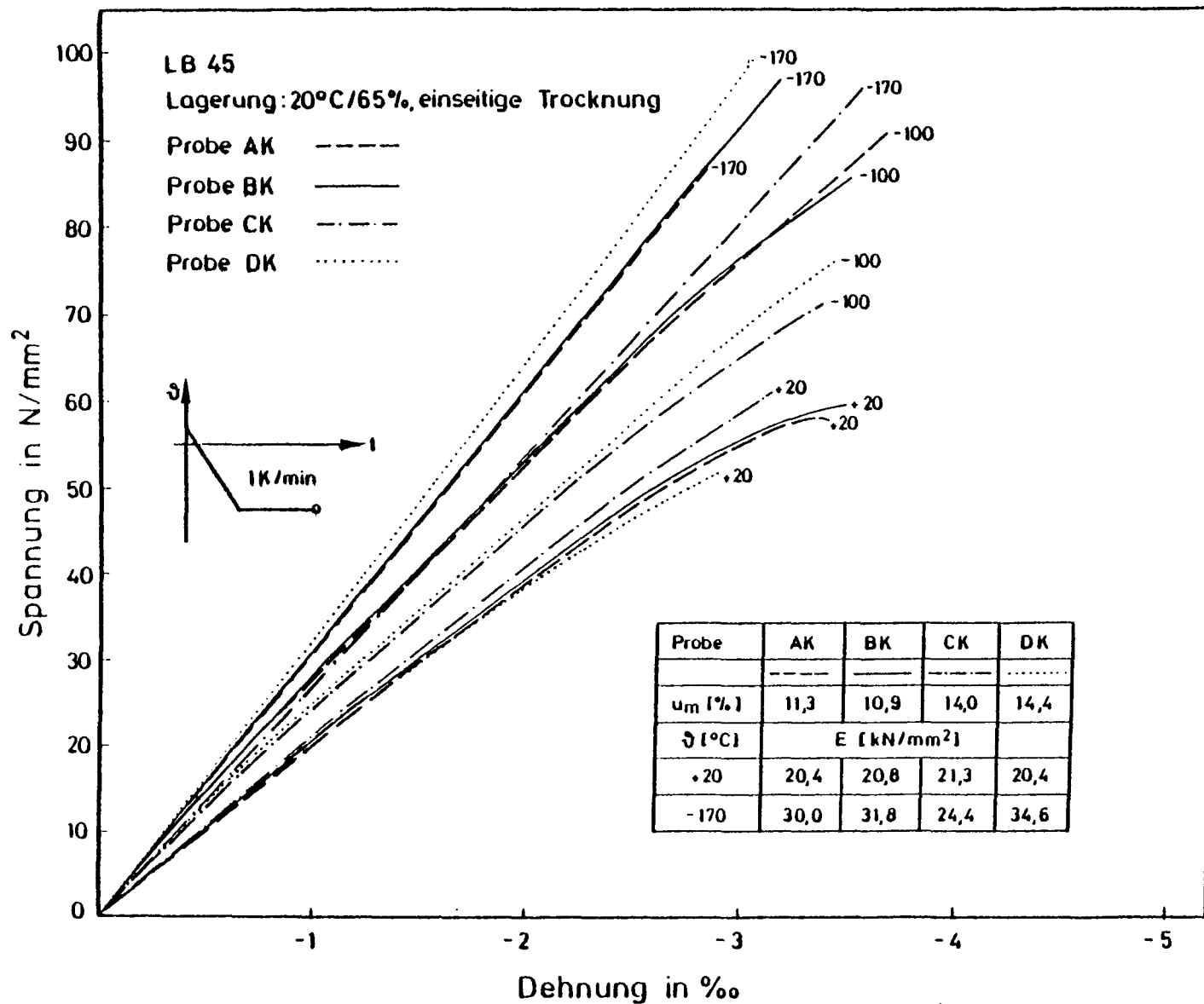


Bild 28: Spannungs-Dehnungs-Linien von Konstruktionsleichtbeton mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" bei tiefen Temperaturen

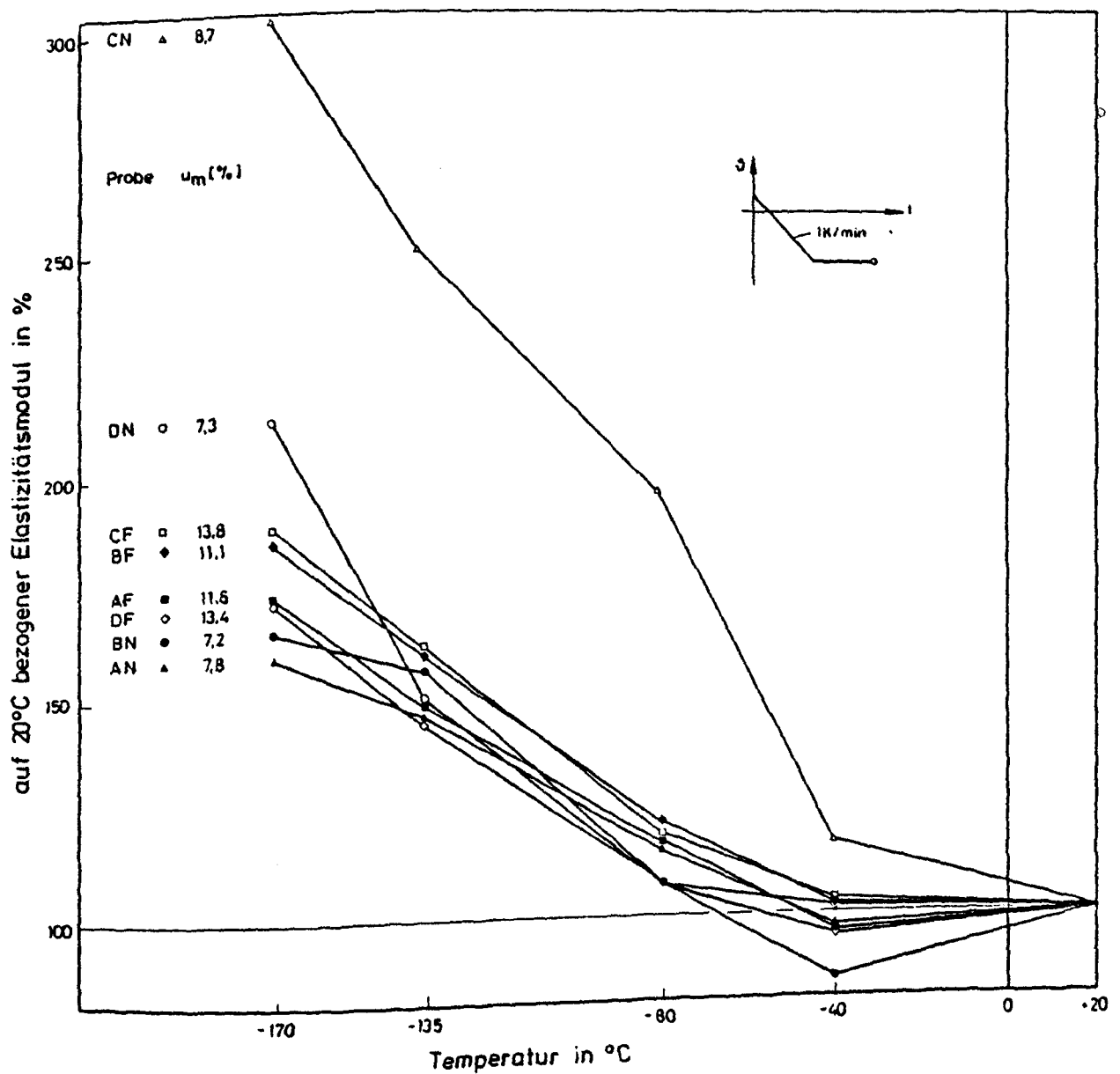


Bild 29: Bezogener Elastizitätsmodul $E(T)/E(+20^\circ)$ von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 bei tiefen Temperaturen

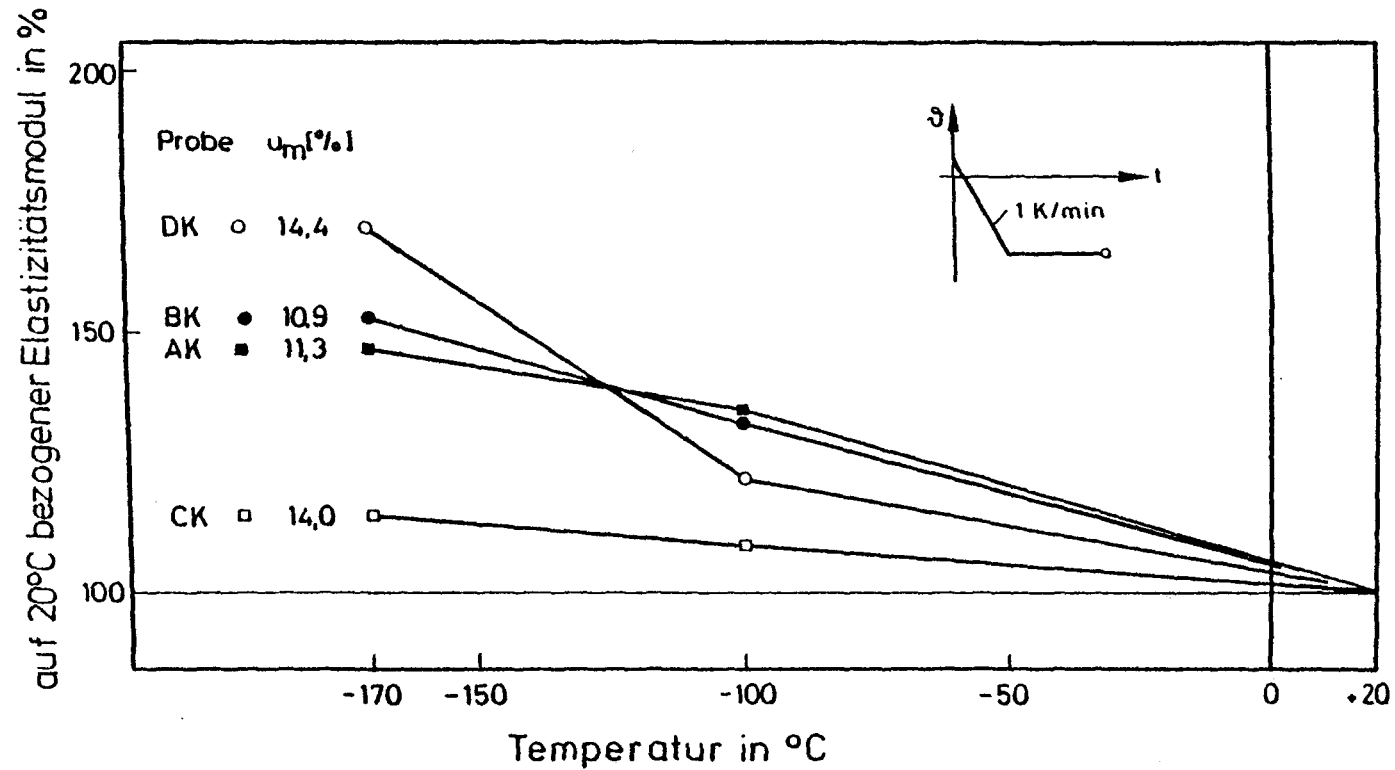


Bild 30: Bezogener Elastizitätsmodul $E(\theta)/E(+20^\circ)$ von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" bei tiefen Temperaturen

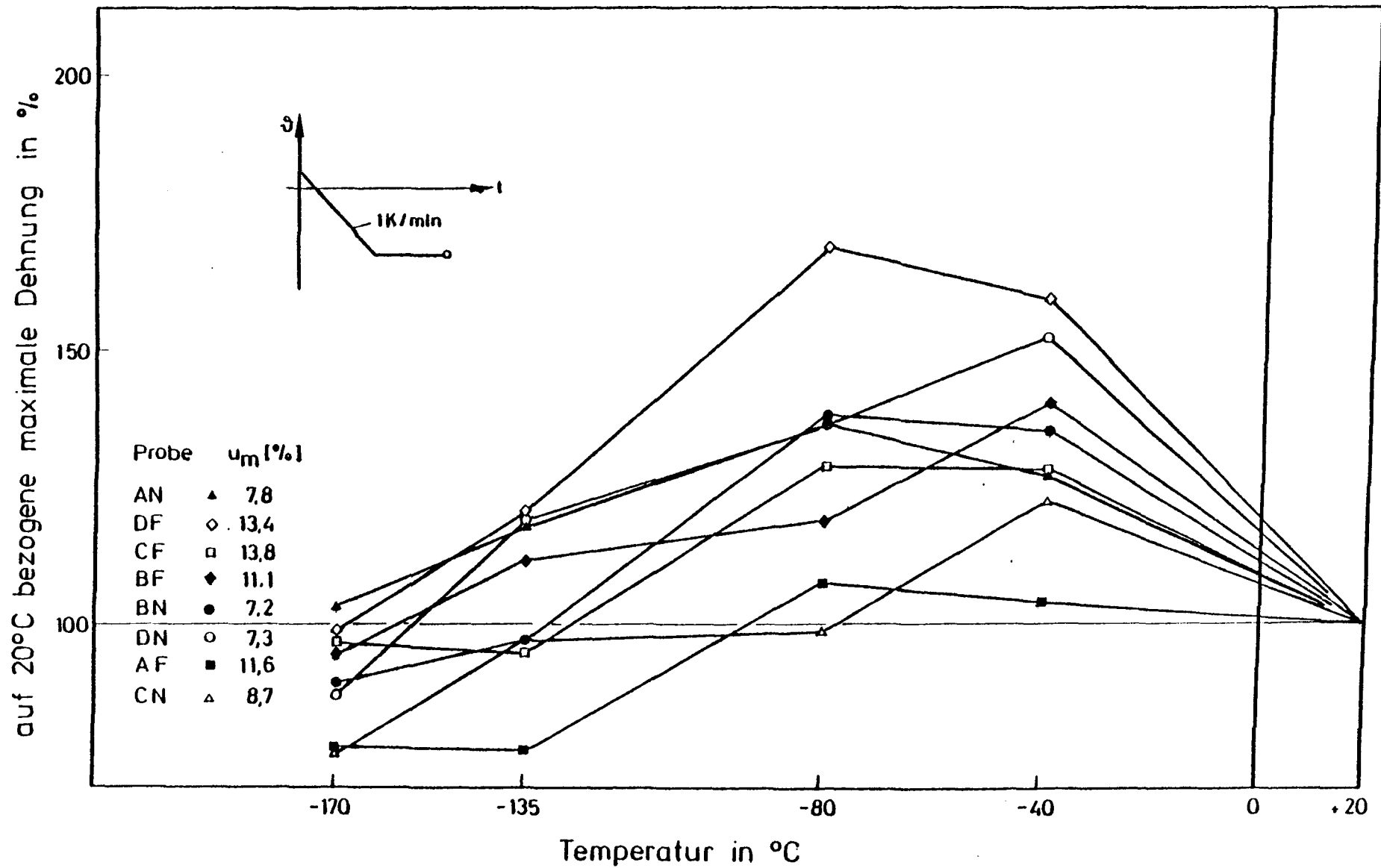


Bild 31: Bezogene maximale Dehnungen $\epsilon_{\max}(\vartheta)/\epsilon_{\max}(+20^{\circ})$ von normalgelagertem und versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 bei tiefen Temperaturen

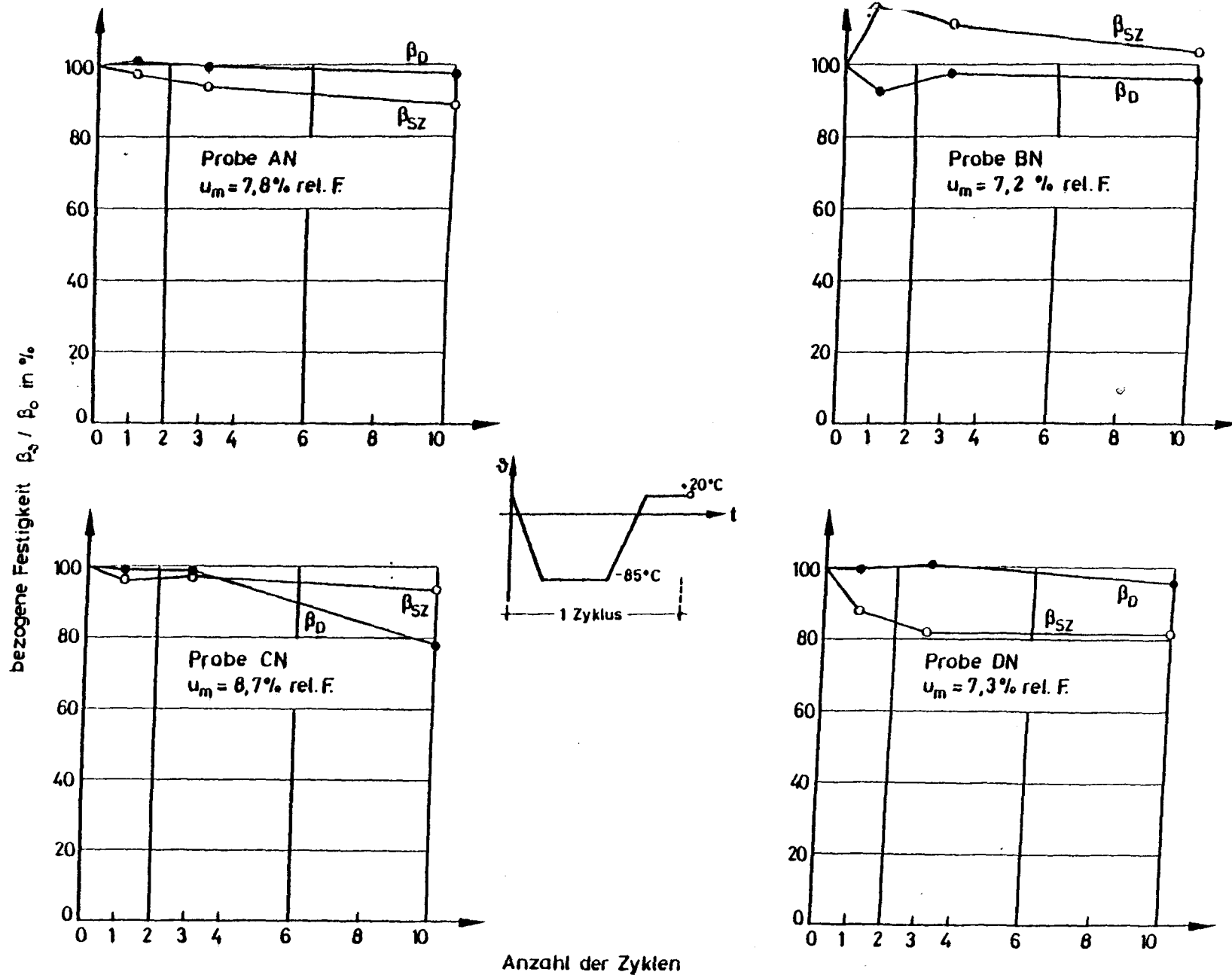


Bild 32: Relative Restfestigkeit von normalgelagertem Konstruktionsleichtbeton LB45 in Abhängigkeit von der Anzahl der Temperaturzyklen; Prüftemperatur $+20^\circ\text{C}$

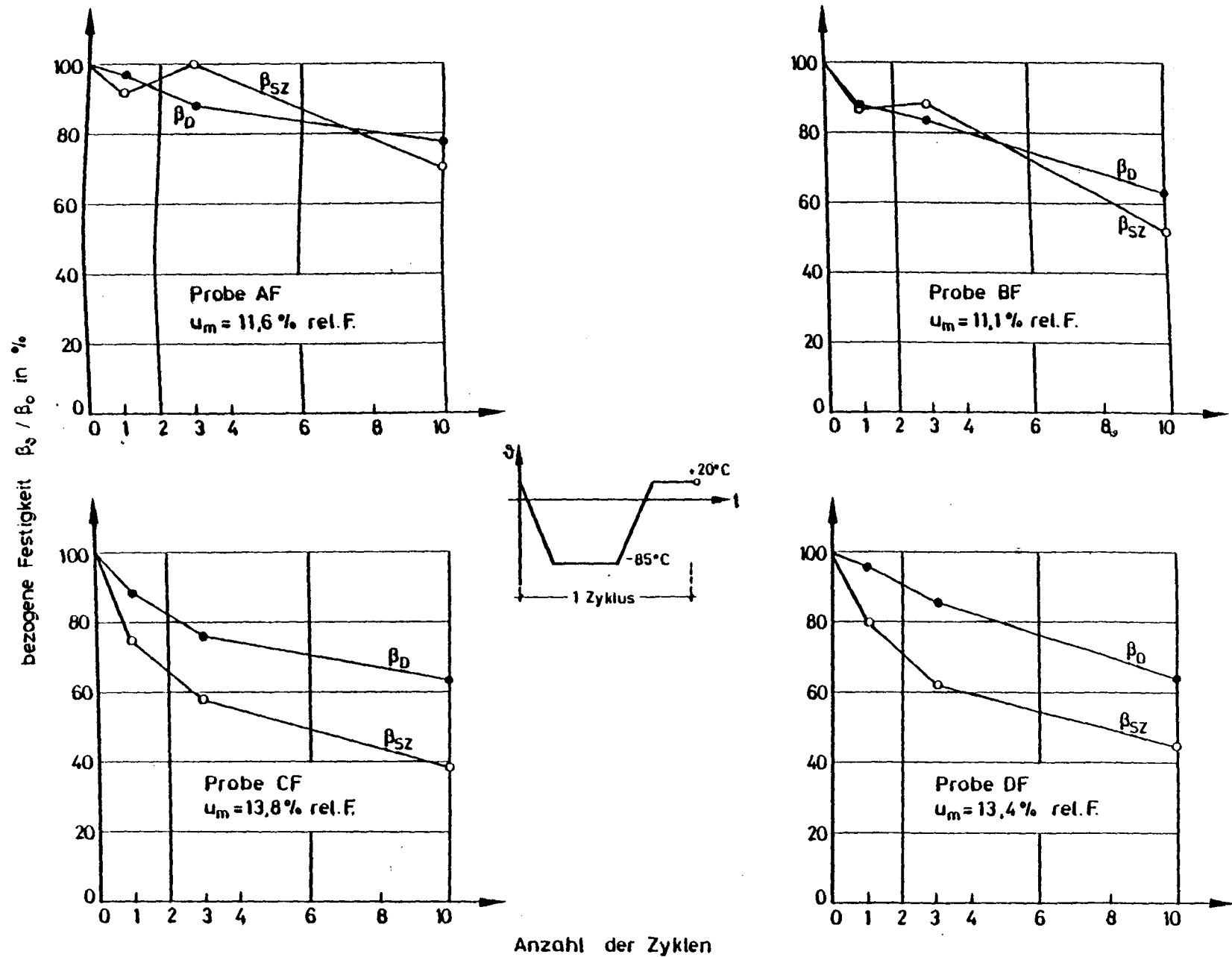


Bild 33: Relative Restfestigkeit von versiegeltem Konstruktionsleichtbeton LB45 in Abhängigkeit von der Anzahl der Temperaturzyklen; Prüftemperatur $+20^\circ\text{C}$

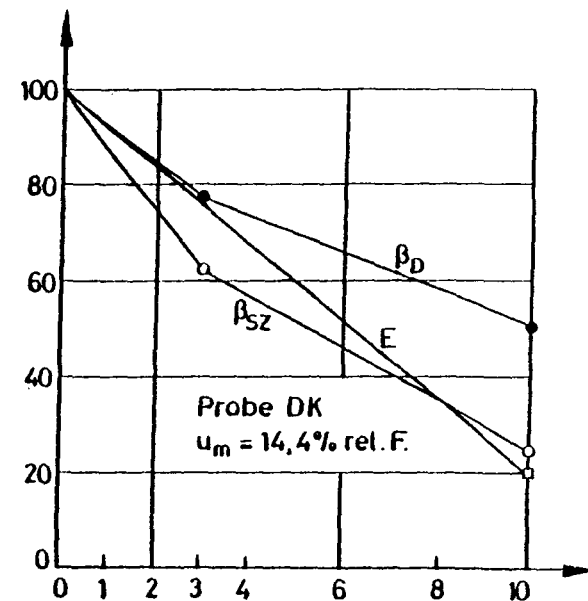
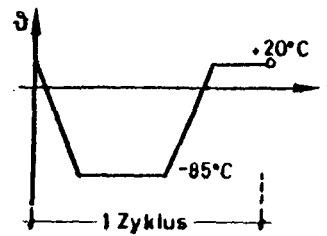
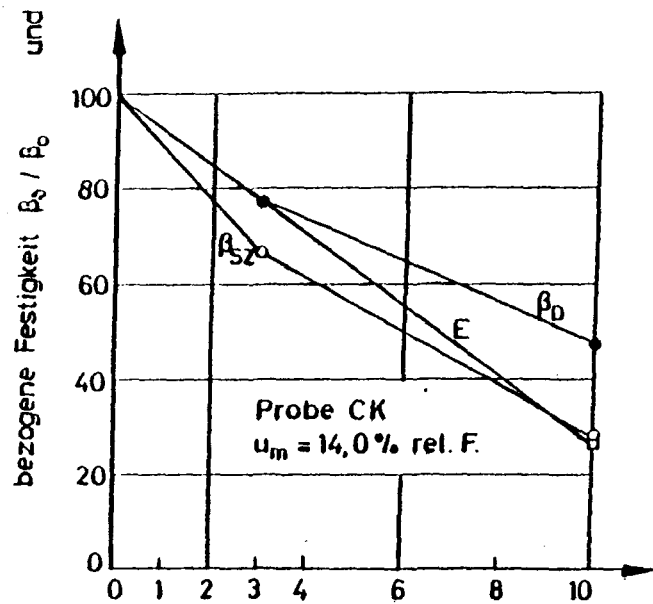
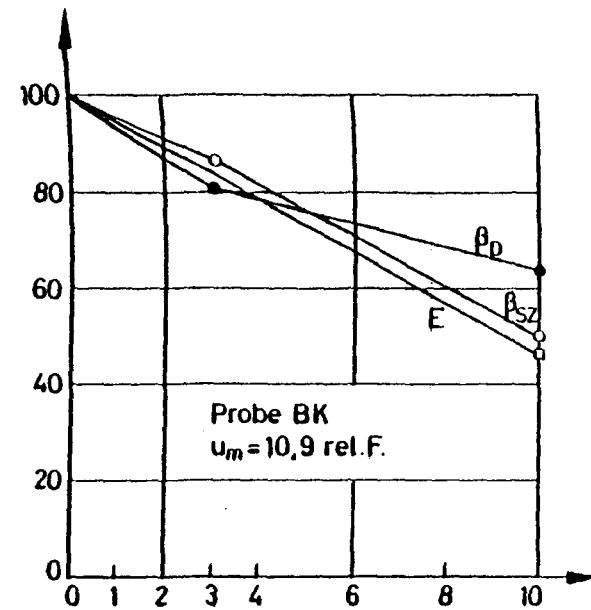
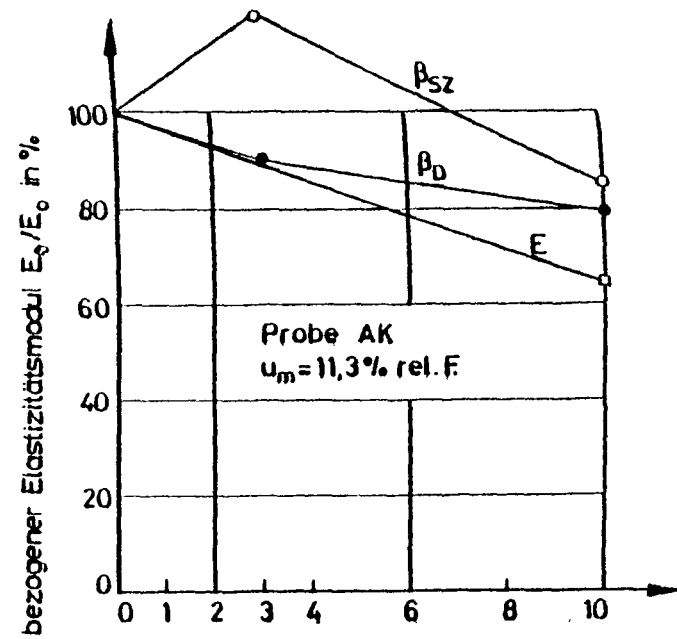


Bild 34: Relative Restfestigkeit und relativer Elastizitätsmodul von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" in Abhängigkeit von der Anzahl der Temperaturzyklen; Prüftemperatur $+20^\circ\text{C}$

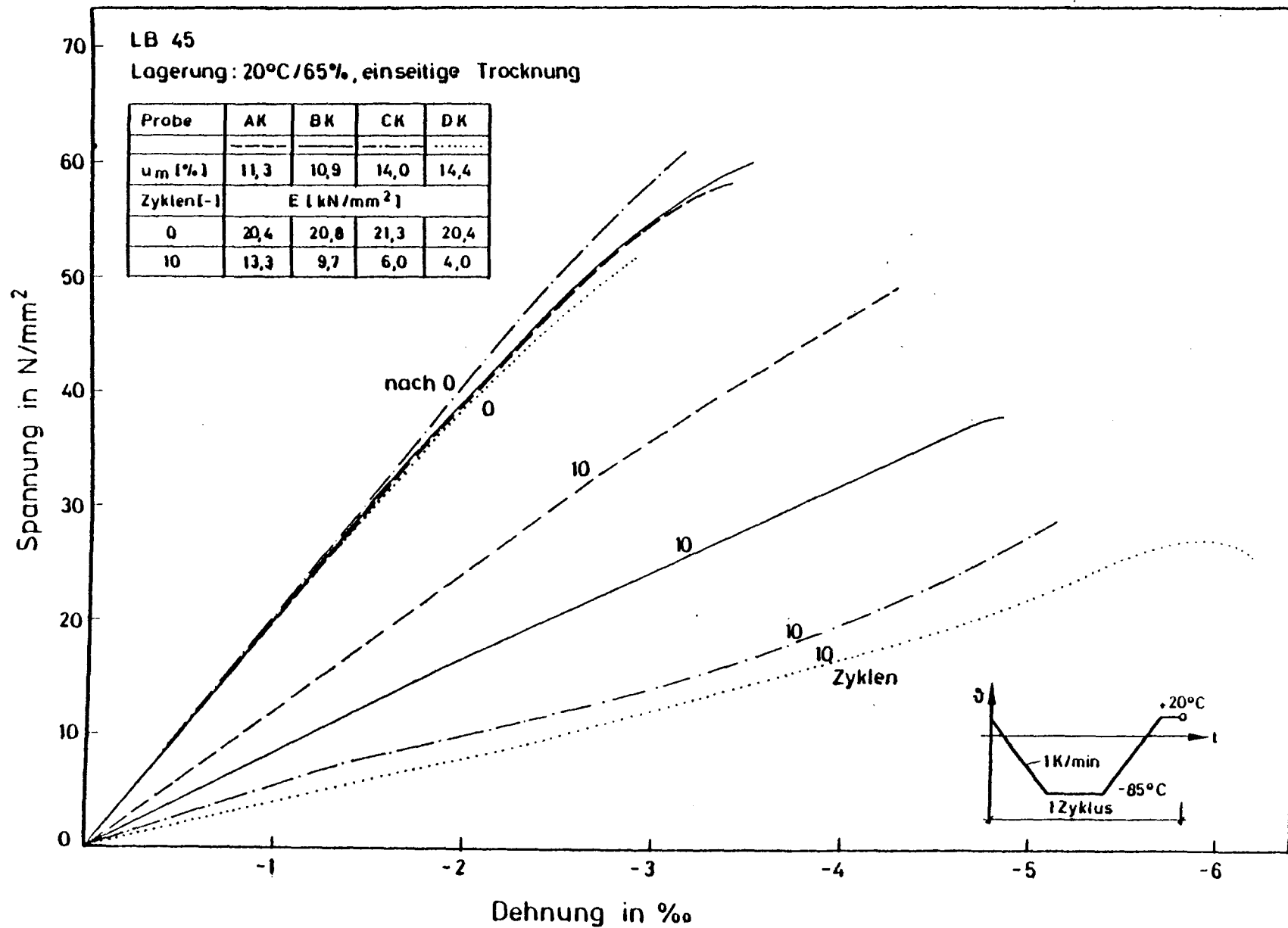


Bild 35: Spannungs-Dehnungs-Linien von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung" nach 0 und 10 Temperaturzyklen; Prüftemperatur +20°C

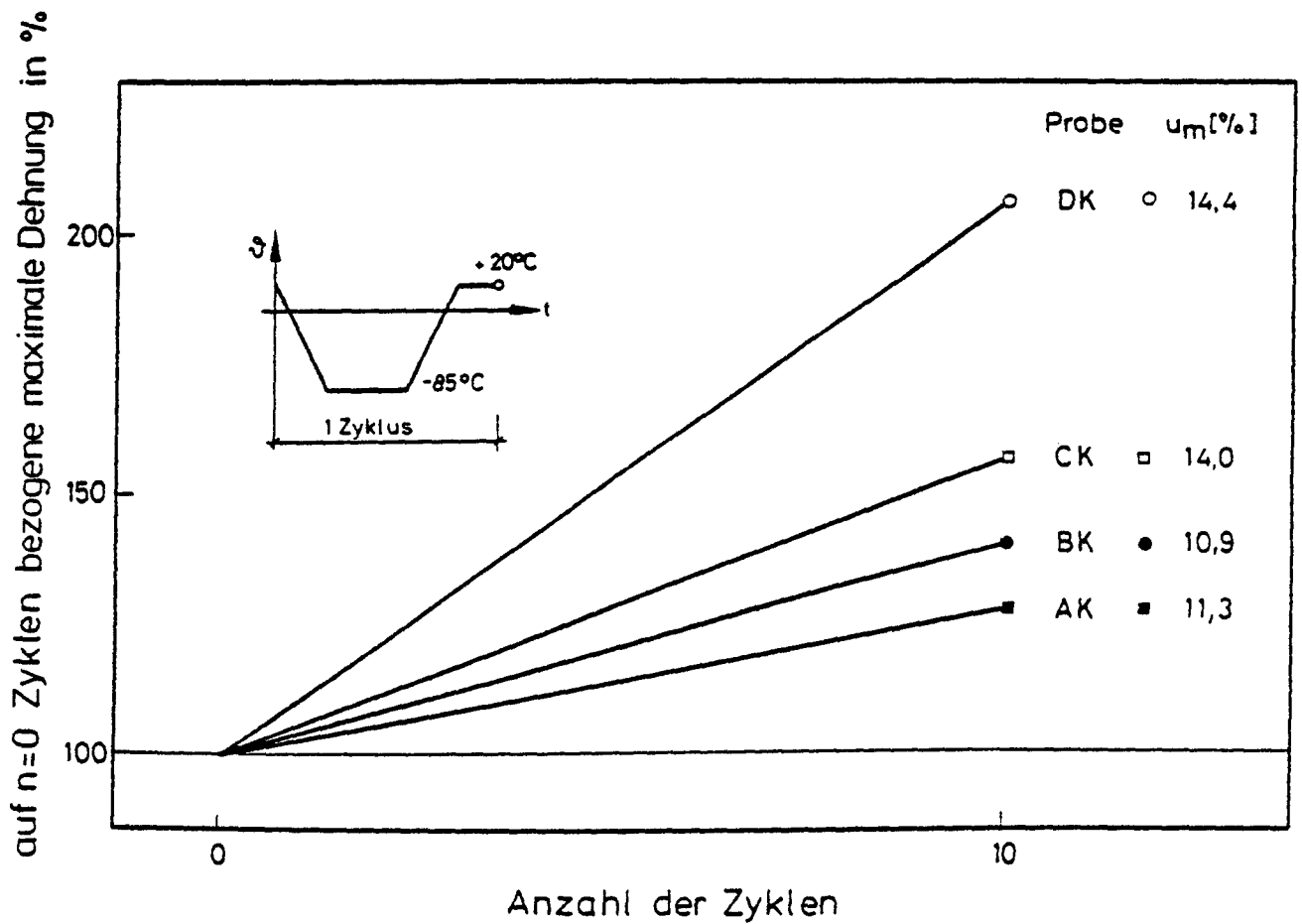


Bild 36: Bezogene maximale Dehnungen $\epsilon_{\max}(n = 10)/\epsilon_{\max}(n = 0)$ von Konstruktionsleichtbeton LB45 mit der Lagerungsart "einseitige Trocknung"; Prüftemperatur +20 °C

DBROR 323
Verof 1 959
Forn
19. Dez. 1984